

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри

(підпис) **Сергій ПЕРЕСАДА**

“ ____ ” _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-професійною програмою «Електромеханічні системи

автоматизації, електропривод та електромобільність»

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та

електромеханіка»

на тему:

Дослідження режимів роботи підвісної канатної дороги при варіаціях її навантаження

Виконав (-ла): студент (-ка) 2 курсу, групи ЕП-91мп

Руднєв Дмитро Вячеславович
(прізвище, ім'я, по батькові)


(підпис)

Науковий керівник к.т.н., проф. Печеник М. В.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я, по-батькові)


(підпис)

Консультант _____

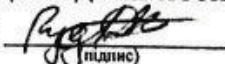
(назва розділу) (посада, науковий ступінь, вчене звання, , прізвище, ім'я, по-батькові) (підпис)

Рецензент к.т.н., проф. Чумак В.В.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище, ім'я, по-батькові) (підпис)


(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент (-ка) 
(підпис)

Київ – 2020 р.

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 141 електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітньо-професійна програма – «Електромеханічні системи автоматизації, електропривод та електромобільність»



ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ Сергій ПЕРЕСАДА

(підпис)

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Руднєв Дмитро Вячеславович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Дослідження режимів роботи підвісної канатної дороги при
варіаціях її навантаження _____

науковий керівник дисертації Печеник Микола Валентинович к.т.н., проф. _____,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____

2. Строк подання студентом дисертації 01.12.2020 _____

3. Об'єкт дослідження підвісна дваканатна дорога _____

4. Вихідні дані продуктивність – 400 крісел/годину; довжина дороги – 700
м; кількість пасажирів на кріслі – 1 людини; вага людини – 90 кг; _____

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: Розробити математичну модель
електромеханічної системи. Отримати модель електромеханічної системи для
дослідження статичних та динамічних характеристик. Виконати дослідження
характеру зміни втрат енергії та динамічної похибки за швидкістю при варіаціях

навантаження механізму. Провести аналіз результатів досліджень, та надати висновки про доцільність використання в електромеханічних системах підвісних канатних доріг асинхронного асинхронного електропривода з векторним керуванням.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу технологічний лист, структурна схема системи керування та модель MATLAB, дослідження перехідних процесів при Мсн, дослідження перехідних процесів при зміні навантаження, дослідження перехідних процесів при зміні швидкості, результати досліджень.

7. Орієнтовний перелік публікацій _____

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

* Якщо визначені консультанти. Консультантом не може бути зазначено наукового керівника магістерської дисертації.

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
	Аналітичний огляд науково-технічної літератури: характеристика режимів роботи і конструкцій підвісної канатної дороги (ПКД), огляд наукових досліджень відносно ПКД з боку вітчизняних і закордонних вчених. Аналіз систем електроприводів ПКД. Постановка завдання досліджень.	15.09.2020	
	Розрахунок та вибір елементів електросилового контуру.	22.09.2020	

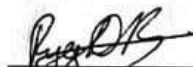
Студент _____

Руднєв Д. В.

* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту.

	керування, розрахунок та вибір її елементів.		
	Синтез регулятора швидкості.	30.09.2020	
	Розробка математичної моделі електромеханічної системи.	10.10.2020	
	Розробка моделі для досліджень динамічних режимів ЕМС на базі Matlab Simulink.	20.10.2020	
	Дослідження динамічних режимів роботи ЕМС ПКД.	10.11.2020	
	Аналіз результатів досліджень.	15.11.2020	
	Виконання стартап проєкту.	20.11.2020	
	Оформлення дисертації.	1.12.2020	

Студент


 (підпис)
Руднєв Д. В.

Науковий керівник дисертації


 (підпис)
к.т.н. Печеник М. В.

РЕФЕРАТ

Дипломний проєкт виконаний на 105 сторінках та вміщує 30 рисунків, 27 таблиць.

Метою даної магістерської роботи являється проведення досліджень електромеханічної системи пасажирської підвісної канатної дороги при використанні електропривода з векторно-керованим асинхронним електродвигуном.

Під час виконання даного дипломного проєкту вирішено такі основні задачі: аналіз електроприводів для систем підвісних канатних доріг, сформування вимог до електроприводу і системи управління, вибір системи електроприводу, розрахунок та вибір елементів для силового контуру електромеханічної системи, розробка математичної моделі для електромеханічної системи підвісної канатної дороги, а також її моделі у середовищі MATLAB Simulink. Досліджено динамічні та статичні режими роботи електромеханічної системи, аналіз зміни рівня енергетичних характеристик електромеханічної системи при варіаціях навантаження та швидкості руху механізму.

Розрахунок й реалізація даного дипломного проєкту забезпечено завдяки використанню наступних програм: MATLAB R2019b, Microsoft Office Word 2010, Microsoft Office Visio 2010, MathCAD 2015.

ПІДВІСНІ КАНАТНІ ДОРОГИ, ПЕРЕТВОРЮВАЧ ЧАСТОТИ, КРІСЕЛЬНИЙ ПІДЙОМНИК, ЕЛЕКТРОПРИВОД, РЕГУЛЯТОР ШВИДКОСТІ, АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, МОДЕЛЮВАННЯ MATLAB SIMULINK, ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМА, СТРУКТУРНА СХЕМА.

					141.5116.015.МД			
		№ докум.	Підпис					
Розроб.	Руднев Д. В.				Дослідження режимів роботи підвісної канатної дороги при варіаціях її навантаження	Літ.	Арк.	Аркушів
Перевір.	Печеник М. В.						7	105
						НТУУ «КПІ ім. І.Сікорського»		
Н. Контр.						Каф. АЕМС-ЕП Гр. ЕП -91мп		
Затверд.	Пересада С. М.							

SUMMARY

The diploma project is made on 105 pages and contains 30 drawings, 27 tables.

The purpose of this master's thesis is to develop and conduct research on the electromechanical system of the passenger cable car. As well as research of perturbation levels and levels of oscillatory processes in static and dynamic modes, during start-up, with changes in load and speed of the traction rope.

During the implementation of this diploma project the following main tasks were solved: analysis of ready electric drive systems designed for overhead cableways, formation of requirements for electric drive and control system, reasonable choice of electric drive system, calculation and selection of power circuit elements of electromechanical system, development of mathematical model of overhead cable system roads, modeling of electromechanical system in MATLAB Simulink environment, research of dynamic and static modes of operation of electromechanical system, research of change of power characteristics of electromechanical system at change of loading on a rope and change of speed of its movement.

The calculation and implementation of this thesis project was provided through the use of the following programs: MATLAB R2019b, Microsoft Office Word 2010, Microsoft Office Visio 2010, MathCAD 2015.

SUSPENDED CABLE ROADS, CHAIR LIFT, ELECTRIC DRIVE,
ASYNCHRONOUS MOTOR, FREQUENCY CONVERTER, SPEED REGULATOR,
SPEED SPEED, SPEED CONTROL, MATLAB SIMULINK

					141.5116.015.MD			
		№ of doc.	Sign					
Devel.		Rudniev D. V.			Research of modes of work of a suspended cableway at variations of installation	L.	Page	Pages
Checked		Pechenik M. V.					8	105
						NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», FEA		
N. Contr.								
Approved		S. Peresada						

ЗМІСТ

ЗМІСТ	7
ВСТУП	9
Розділ 1. Аналітичний огляд науково-технічної літератури	12
1.1 Аналіз режимів роботи і конструкцій підвісних канатних доріг	12
1.2 Огляд науково-технічних рішень в області канатних транспортних доріг	19
1.3 Аналіз систем електроприводів	20
Висновки до першого розділу:.....	26
Розділ 2. Розрахунок та вибір елементів електросилового контуру	28
2.1 Розрахунок потужності та вибір електродвигуна	28
2.2 Розрахунок редуктора	34
Висновки до другого розділу	35
Розділ 3. РОЗРАХУНОК ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ	37
3.1 Розрахунок параметрів номінального режиму та схеми заміщення асинхронного двигуна.....	37
3.2 Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення параметрів електродвигуна	39
3.3 Вибір елементів схеми керування	42
Розділ 4. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ.....	50
4.1 Система векторного керування асинхронним двигуном	50
4.2 Розрахунок регулятора швидкості.....	56
Висновки до четвертого розділу:.....	60

Розділ 5. Дослідження динамічних режимів роботи електромеханічної системи підвісної канатної дороги	61
5.1 Розробка моделі для дослідження динамічних режимів.....	61
5.2 Проведення досліджень роботи електромеханічної системи.....	65
5.3 Дослідження роботи електромеханічної системи ПКД при зміні швидкості руху підвісної канатної дороги	75
Висновки до п'ятого розділу.....	84
Розділ 6. Розробка стартап-проєкту	85
Висновки до шостого розділу	97
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	99
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	101
Додаток 1	104
Додаток 2.....	133

ВСТУП

Актуальність роботи. В наш час все більшого застосування отримує система неперервного транспорту з канатними тяговими елементами, яка забезпечує транспортування людей і вантажів. Як правило, дані електромеханічні системи використовують нерегульований електропривід з системою плавного пуску, при цьому в статичних режимах роботи лінійна швидкість руху являється незмінною. Для вирішення даних питань необхідно використовувати сучасні електроприводи з векторним керуванням, які поряд з високою точністю та відпрацюванням заданого закону керування, дозволяють забезпечувати високий рівень показників динамічних процесів. Виходячи з цього, при впровадженні нових систем електроприводу досить актуальним завданням є оцінка рівня втрат енергії та характеру розподілення динамічних помилок по швидкості при варіаціях навантаження транспортної системи під час використання векторно-керованого асинхронного електродвигуна.

Зв'язок роботи з науковими програмами, темами. Магістерську роботу виконано на кафедрі «Автоматизації електромеханічних систем та електроприводу НТУУ «КПІ» ім. Ігоря Сікорського» у відповідності до плану підготовки магістрів.

Мета роботи та задачі дослідження. Метою роботи є на основі дослідження характеру зміни втрат енергії та динамічної похибки швидкості руху підвісної канатної дороги при варіаціях її навантаження та провести оцінку доцільності використання векторно-керованого асинхронного електродвигуна.

Для досягнення цієї мети потрібно вирішити наступні задачі:

1. Розробити математичну модель електромеханічної системи.
2. Отримати модель електромеханічної системи для дослідження статичних та динамічних характеристик.
3. Виконати дослідження характеру зміни втрат енергії та динамічної похибки за швидкістю при варіаціях навантаження механізму.

4. Провести аналіз результатів досліджень, та надати висновки про доцільність використання в електромеханічних системах підвісних канатних доріг асинхронного асинхронного електропривода з векторним керуванням.

Об'єкт дослідження. Процеси автоматичного регулювання в підвісних канатних дорогах.

Предмет досліджень: електромеханічна система підвісної канатної дороги при варіаціях її навантаження.

Науково-практична цінність одержаних результатів.

1. Отримані моделі електромеханічної системи забезпечують проведення досліджень характеристик електромеханічної системи підвісної канатної дороги при використанні асинхронного векторно-керованого електродвигуна.
2. Обумовлена доцільність використання електропривода з векторним керуванням для канатних транспортних систем неперервної дії.
3. Основні положення наданої роботи можуть використовуватись при проектуванні нових і модернізації діючих електроприводів підвісних канатних доріг.

Апробація результатів роботи. Основні результати роботи розглядалися на XIV Міжнародній науково-технічній конференції молодих учених, аспірантів, студентів факультета електроенерготехніки та автоматики. «Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики», Київ, 2020.

Публікації. Основні результати роботи представлені в науковій статті «Аналіз характеристик електромеханічної системи підвісної канатної дороги при використанні векторно-керованого асинхронного електродвигуна» Руднєв Д. В., студент, Печеник М. В., к.т.н., Бур'ян С. О., к.т.н., доц.. «КПІ ім. Ігоря Сікорського», кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу.

Обсяг і структура дисертації. Магістерська дисертація має 6 розділів, висновки, перелік посилань, 2 додатки. Загальний обсяг роботи 102 сторінок, 27 таблиць, 33 ілюстрацій.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1.1 Аналіз режимів роботи і конструкцій підвісних канатних доріг

За призначенням підвісні канатні дороги поділяються на вантажні та пасажирські; по конструкції - на одноканатні і двоканатні; за характером руху вантаженесучих елементів (вагонеток або крісел) - на кільцеві і митників.

Як промисловий транспорт вантажні канатні дороги застосовуються на внутрішньозаводських і зовнішніх перевезеннях, особливо в умовах пересічної та гірської місцевості. Часто використовуються для вивезення відходів у відвали.

Пасажирські канатні дороги можуть працювати в найсуворіших кліматичних умовах. Вони проходять через гірські перевали і досягають відміток до 4000 - 5000 метрів над рівнем моря. У зв'язку з цим виникає питання усунення шкідливого впливу на пасажирів різкої зміни атмосферного тиску. Для цього, починаючи з відміток приблизно 3000 – 3500 метрів, кабіни вагонів канатної дороги іноді оснащують пристроями для підтримки внутрішнього тиску, використовуючи циліндри з стиснутим повітрям або заряджаючи повітрям трубковий каркас вагону. В таких випадках на верхній станції пасажирів виходять з вагону через повітряні шлюзи, в яких проходить поступовий перехід тиску.

Пасажирські дороги, так само як і грузові, чутливі до дії вітру (особливо поперечного), викликаю чого відхилення і розгойдування вагону або пасажирського крісла. По правилах ППКД-64, рух дороги дозволяється при швидкості вітру до 15м/сек [1].

Швидкість руху дороги суттєво відображається на її вартості. Підвищення швидкості при маятниковому типі руху дозволяє зменшити вмісткість та вагу вагону, а при кільцевому русі – скоротити кількість вагонів або пасажирських кабін на лінії, тим самим зменшити навантаження несучого і тягового канатів.

Маятникові двоканатні дороги являються дорогами універсального типу, гідними для будь-яких кліматичних умов і характеристик місцевості, з самими важкими гірськими рельєфами.

Області застосування пасажирських канатних доріг надзвичайно різноманітні. Найбільшого розповсюдження вони набули для обслуговування курортів і спортивних баз. Канатні дороги дозволяють освоїти більшість гірських районів і організувати там курорти, лижні та туристичні бази. В великих гірських районах будуються цілі мережі пов'язаних між собою канатних доріг, при чому доволі часто практикується сумісна робота маятникових та кільцевих типів доріг[2].

Пристрій підвісної канатної дороги. Найбільш поширеною в промисловості для вивезення відходів у відвали є двоканатна кільцева дорога, зображена на рис. 1.1. Також цей тип дороги повністю підходить для перевезення пасажирів на гірсько-лижних курортах.

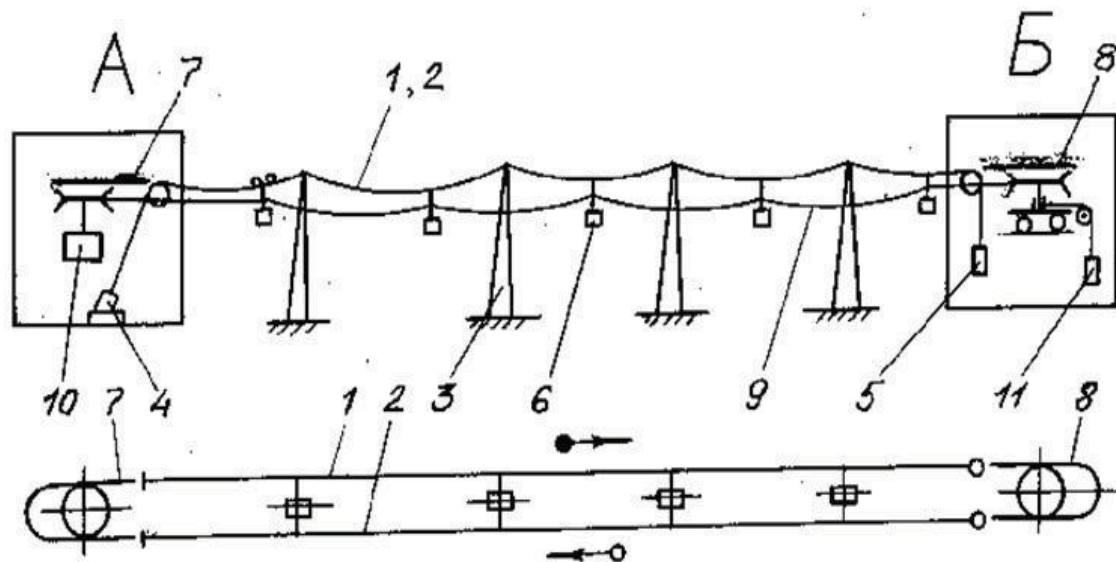


Рисунок 1.1 - Підвісна двоканатна кільцева дорога:

Елементи, що зображено на рис. 1.1 відповідно номерам мають наступні назви:

- 1 - несучий канат вантажний гілки;
- 2 - несучий канат порожнякової гілки;
- 3 - опора;
- 4 - якор;
- 5 - натяжні вантажі;
- 6 - вагонетка;

7,8 - станційні колії;

9 - тяговий канат;

10 - привід;

11- вантаж для направляючих.[2]

Несучим елементом, по якому рухаються вагонетки 6, є гнучкі канати 1 і 2 (1 - для вантажної, 2 - для холостий гілки), підвішені на опорах 3. Ці канати з одного боку закріплюються якорями 4, а з іншого натягуються вантажами 5. На станціях (А - завантажувальна, Б - розвантажувальна) вагонетки переміщуються по жорсткому шляху 7 і 8 зі спеціальних рейок спеціальними штовхають конвеєрами.

При виході зі станції вагонетка чіпляється до тягового каната 9, зчалених в замкнуте кільце. Тяговий канат переміщається фрикційним приводом 10, встановленим на станції А, і натягується обвідним шківом, який має можливість переміщатися в направляючих за допомогою вантажу 11 (на станції Б).

Підключення вагонеток до тягового каната і їх від'єднання від нього проводиться за допомогою так званих вмикачів і вимикачів.

Завантаження вагонеток проводиться спеціальними пристроями - живильниками, розвантаження - шляхом перекидання вагонетки під вагою вантажу або через що відкривається дно.

На відвальних дорогах (підвісні дороги, призначені для утворення відвалів) вагонетки розвантажуються нема на станції, а в проміжних точках, формуючи відвал потрібної форми: хребтовий, секторний, прямокутний.

Основні параметри. Продуктивність підвісних канатних доріг досягає 600 т/год. Є розробки на дорогу продуктивністю 1000 т/год. При цьому застосовуються восьмиколесні вагонетки вантажопід'ємністю 5,2 т. Швидкість руху вагонеток на кільцевих дорогах до 3,2 м/с, на маятникових - до 10 м/с. На маятникових дорогах застосовуються великовантажні вагонетки вантажопідйомністю 25 т. Довжина маятникових доріг до 1,5 км, кільцевих - 5 ÷ 8 км (відома дорога протяжністю близько 98 км). Відстань між опорами 100 ÷ 150 і більше метрів. Ухил траси - 300. Можливо до 500.[2]

Переваги і недоліки. Легко обслуговується гнучкий, легкий, міцний, просто і надійно сполучається з окремих шматків канатів, дозволяє перекривати прольоти в кілька сотень метрів на деякій висоті від землі. Канатна тяга забезпечує великі кути підйому шляху.

Тому канатна дорога має такі переваги:

- її можна протягувати по найкоротшій відстані, не оминаючи будівель, ліси, ярів і з ухилом до $45 \div 500$, що недоступно іншим видам транспорту (не потрібно будувати мости, тунелі та ін.);
- можливість безперебійної роботи при будь-яких погодних умовах (крім урагану);
- використовує екологічно чистий і недорогий енергоносіє;
- працює безшумно;
- забезпечує високу ступінь механізації навантаження і розвантаження вантажів.[2]

Недоліками підвісних канатних доріг є:

- високі капітальні одноразові витрати (хоча не вище витрат на залізничному і автомобільному транспорті, навіть при будівництві ліній з стрічковими конвеєрами);
- складність виконання будівельно-монтажних робіт;
- істотно менша продуктивність у порівнянні з продуктивністю стрічкових конвеєрів.

Канатні дороги (КД) є екологічним і економічним транспортом, використовуваним для перевезення пасажирів і вантажів, які мають найбільшого поширення в умовах складного гірського рельєфу. Останнім часом КД стали використовуватися як міський і міжміський громадський транспорт [4]. Ці тенденції, матеріали всесвітньої туристичної організації про туристичний потенціал України, державні програми розвитку туристично-рекреаційних зон підвищують інтерес до будівництва КД в Україні. У зв'язку з цим вимагають уваги питання проєктування КД і узгодження КД з генеральними планами гірничих рекреаційних центрів (ГРЦ).

Комфортність ГРЦ і особливо тих, в яких основним напрямком є гірськолижний відпочинок та туризм, багато в чому залежить від грамотного розташування КД, їх типу і технічних характеристик [4].

У концепції КД має бути визначено функціональне призначення КД: для гірськолижних трас і / або туристичних зон і зон відпочинку; тривалість сезону експлуатації; схема комунікацій з об'єктами гірського рекреаційного центру; гранична місткість приймальні бази і т.п. [4].

При вирішенні цих питань основне значення має вибір осі КД, майданчиків розташування верхньої і нижньої станцій, вузлів пересадки. Необхідно прагнути до того, щоб розташування станцій КД забезпечувало зручний підхід і під'їзд до них, а також перехід до лижних трасах, туристичним об'єктам, готелям, автостоянок, місць зупинок громадського транспорту. При наявності суміжних зон катання мережу КД повинна бути постоєна таким чином, щоб забезпечити перехід з однієї зони в іншу без повернення на базу. У тих випадках, коли необхідний доступ до додаткових об'єктів і неможливо забезпечити прямолінійність осі КД, її поділяють на кілька черг з відповідною кількістю зон пересадки.

Аналіз планувальних рішень популярних рекреаційних центрів Альп, який проведено з використанням інформації[6] дозволяє зробити наступний висновок: для зручності відпочиваючих відстань від житлових / готельних комплексів до нижніх станцій КД має перебувати в межах від декількох десятків метрів до декількох сотень метрів. Це забезпечує зручність експлуатації підйомників і користування інфраструктурою центру, а також полегшує проектування зони ski-in / ski-out [4]. Бажано, щоб перепад висот між нижніми станціями КД і рівнем розташування готелів не перевищував 20 ... 30 м, так як більший перепад вимагає значних фізичних нагрузок.

Для розрахунку пропускної здатності необхідно знати кількість пасажирів на годину або на добу і співвідношення пасажиропотоків вгору-вниз, мати дані про потужності приймальної бази центру, ємності інфраструктури, активності її

використання та пропускної здатності гірськолижних трас, яка залежить від довжини траси, ширини і перепаду висот.

Для КД з кільцевих рухом пропускна спроможність, люд / год, визначається за формулою

$$M=3600 \frac{N}{T} \quad (1.1)$$

де T - інтервал, з, між одиницями рухомого складу, регламентований ПБ 10-559-03 Держнаглядохоронпраці України «Правил будови і безпечної експлуатації пасажирських підвісних і буксирувальних канатних доріг» [4]; N - місткість рухомого складу.

Співвідношення між сумарною пропускною спроможністю КД гірничо-рекреаційних центрів і ємністю приймальні бази рекреаційного ядра має становити приблизно 3:1. Розрахунок оптимального розміру черги на підйомники провадиться виходячи з коефіцієнта співвідношення часу підйому з часом стояння в черзі. Коефіцієнт не може перевищувати співвідношення 1:1,5 [4].

Пропускна здатність КД визначає вибір її типу. Основними типами пасажирських КД, згідно [4], є підвісні та буксирувальні КД.

Більш вузьке розподіл провадиться в залежності від кількості несучих канатів, типу затиску, рухомого складу/бугеля. У натоющее час технічні можливості КД удосконалилися таким чином, що дозволяють мати швидкість руху КД до 7 м/с, пропускну здатність до 4500 чол / год і експлуатувати КД при швидкості вітру до 25 м/с [4].

Технічні характеристики КД містяться в її технічній документації. Залежно від специфіки проекту і фірми-виробника обладнання (найбільш відомими на українському ринку є: РОМА, Doppelmaur, Австрія, Leither, СКАД), перелік цих параметрів може бути змінений і доповнений.

Наприклад, внесена інформація про швидкість рухомого складу на станціях, м / с; швидкості при роботі аварійного приводу, м / с; допустимої негативною

температурі при експлуатації, °С, та ін. Список загальних технічних характеристик КД наведено нижче.

Основні характеристики КД на які потрібно звернути увагу[4]:

1. Тип дороги.
2. Завантаження дороги:
 - 2.1. На стороні підйому,%;
 - 2.2. На стороні спуску,%.
3. Пропускна здатність (в одному напрямку), чол / год.
4. Швидкість руху, м / с.
5. Час проїзду в одному напрямку, хв.
6. Рухомий склад (вагони, кабіни, крісла):
7. Тип;
8. Місткість, чол.;
9. Власну вагу, кН;
10. Корисне навантаження, кН;
11. Кількість (на трасі), шт .;
12. Відстань між кабінами (кріслами), м;
13. Інтервал посадки в кабіни (крісла), м.
14. Перевищення верхньої станції над нижньою, м.
15. Довжина дороги, м:
16. По схилу, м;
17. По горизонталі, м.
18. Ширина колії, м.
19. Сторона підйому.
20. Кількість опор, шт.
21. Висота опор, м.
22. Максимальна окружне зусилля на приводному шкіф, кН.
23. Максимальна швидкість вітру, при якій допускається робота дороги,

м/с.

Кожен структурний елемент КД має певні геометричні розміри і прив'язку в плані. Більш жорстко ці вимоги виражені для траси КД, так як в них укладені заходи підвищують безпеку об'єкта.

Заплановано, що підвісна канатна дорога повинна бути прямолінійна між станціями, максимальний кут нахилу несучого і несуче-тягового канатів не повинен перевищувати 45° , для бугельних КД: 30° - для доріг з одномісними буксирувальними пристроями і 26° - з двомісними. При проектуванні слід враховувати, що кут нахилу каната приблизно дорівнює середньому ухилу траси /лижної доріжки в проміжках між опорами. Наближення будівель або природних перешкод до зовнішніх габаритів пасажирських підвісних канатних доріг (ППКД) допускається на відстань не менше 1 м, для бугельних - 2 м[4].

Відстань по вертикальній осі від нижчої точки рухомого складу або будь-якого каната ППКД до землі (з урахуванням снігового покриву) має бути не менше 3,0 м в тих місцях, де можлива присутність людей і не менше 2,0 м в місцях, де присутність людей виключається. Відстань до верху дерев - не менше 1,5 м, до вищої точки будівлі або споруди, що знаходиться під трасою ППКД, а також до верху залізничного, автодорожнього або судноплавного габариту - більше 2,0 м[4].

1.2 Огляд науково-технічних рішень в області канатних транспортних доріг

Корисна модель підвісної канатної дороги належить до засобів підвісного транспорту із замкнутим тяговим канатом і призначена для транспортування людей і вантажів по похилим трасам. Відома підвісна канатна дорога з кільцевим рухом пасажирських вагонів по несучому канату, у якій для підвищення продуктивності використовуються для транспортування обидві гілки замкнутого тягового канату, при цьому у кінцевих пунктах траси вагони відокремлюються від тягового канату для посадки і висадки пасажирів та надання можливості останньому для безперешкодного проходу через шків приводної та натяжної станцій [2]. Недоліком цієї дороги є значна залежність споживання електричної

енергії від фактичного завантаження пасажирських вагонів та тягових гілок канату у цілому, що призводить до зростання споживання електроенергії та собівартості транспортування. Канатна дорога працює наступним чином. Привідна станція зі шківом тертя приводить у рух замкнутий тяговий канат, разом з яким починають рухатися по несучому канату за допомогою ходових блоків вагони - нагору та униз . Після досягнення черговим вагоном кінцевого майданчика він відчепляється від тягового канату за допомогою фіксатора і далі переміщується окремим приводом сповільнено до зупинки, після чого виконується посадка-висадка пасажирів. Одночасно лічильники визначають кількість пасажирів у вагонах, що рухаються відповідно на підйом і по спуску і передають цю інформацію на керуючий блок, який у залежності від їх співвідношення надає сигнали на відкриття або закриття секторних затворів. При цьому тягар, розташований на похилій направляючій та у контейнері під підлогою вагона, або рухаються у такий же контейнер під вагоном, або залишаються на своїх місцях. Після паузи на посадку-висадку пасажирів вагон, рухається по обвідним направляючим або прискорюється до швидкості тягового канату за допомогою окремого привода і поєднується з останнім фіксатором. Приєднання до вагонів додаткових тягарів у періоди найбільшого пасажиропотоку в одну сторону дозволяє знизити сумарне тягове зусилля приводної станції і, відповідно, енергоспоживання, підвищити безпеку і зручність експлуатації[3].

1.3 Аналіз систем електроприводів

При виборі електроприводу для системи підвісної канатної дороги особливо важливим являється попереднє визначення режимів роботи двигуна у відповідності до схилів траси і ступеню завантаження людьми під час роботи. Електропривід працюватиме тільки в руховому режимі, для підйому вантажів, в генераторному режимі, при спусканні вантажів, і зі знакозмінним навантаженням, якщо за час роботи кілька разів змінюється навантаження і двигун працює то в генераторному режимі, то в руховому.

Найважливіші вимогами, пред'явленими до електроприводу системи підвісної канатної дороги являється плавний пуск і гальмування системи. Така вимога спричинена головним чином через наявність великих махових мас, що має механічне обладнання дороги, а також перевантаженнями канатів, які можуть виникати при різких змінах швидкості. Потужність приводного двигуна визначається по максимальному тяговому зусиллю на канаті і швидкості руху[1].

Зазвичай промислові канатні дороги пересувають кабіни зі 2 – 4 м/сек [2].

Під час керування системою ПКД необхідно керувати електроприводом, слідкуючи, щоб механічні змінні такі як момент двигуна, а також швидкість та прискорення робочого механізму підтримувалися на необхідному рівні або змінювалися з необхідною точністю [2].

У відношенні до потрібного електропривода можна сформулювати наступні вимоги[7]:

- можливість плавного пуску з можливістю обмеженням прискорення та різких змін ($M_p \leq M_n$);
- мінімальна тривалість відпрацювання перехідних процесів (не більше 2 с);
- можливість реверсивної роботи електроприводу;
- мінімум енергетичних втрат під час регулювання;
- мінімальна динамічна похибка по швидкості ($\leq 5\%$);
- широкий діапазон для регулювання швидкості механізму 10:1;
- можливість обмеження значення динамічного навантаження в механічних вузлах;
- максимальна точність в динамічних та статичних режимах;
- мінімізація коливань, а також перерегулювання.

Також система обраного електроприводу має містити в собі такі види захисту:

- Від перевищення швидкості;
- Від перевантажень по струму;
- Від втрати напруги в ланцюзі керування і силовий захист ланцюга;
- Від неправильного чергування фаз.

Асинхронний двигун з короткозамкненим ротором. Для систем, в яких відсутня необхідність регулювання швидкості руху і моменту пуску, зазвичай використовують асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором оснащені подвійною «білячою кліткою», які характеризуються підвищеним значенням пускового моменту при відносно незмінному його значенні в процесі пуску і забезпечують менший нагрів двигуна в умовах тривалого пуску[7].

Переваги:

- Досить простий в роботі;
- Досить простий в експлуатації.

Недоліки:

- Невелике значення коефіцієнту зчеплення між барабаном та канатом;
- велика ймовірність просковзування канату по барабану.

Асинхронний двигун з фазним ротором. Питання пуску підвісних канатних доріг вирішується шляхом використання асинхронних двигунів з фазним ротором. Використання таких двигунів дає змогу обмежити пускові струми, а також забезпечує формування необхідних характеристик електроприводу[7].

Переваги:

- плавний пуск;
- не важка для розуміння система керування;
- підтримка роботи на низькій швидкості.

Недоліки:

- потреба великої кількості контактної апаратури, яка суттєво знижує надійність всієї системи керування;
- складні експлуатаційні умови.

Асинхронний двигун з тиристорним комутатором в колі ротора. При використанні реостатного способі управління двигуном плавний пуск забезпечується тільки завдяки збільшенню числа пускових ступенів. Такий недолік усунений у схемі управління асинхронним двигуном з тиристорним комутатором в колі ротора. Ця схема під час перехідних процесів забезпечує

майже ідеальну підтримку струму ротора, а також моменту двигуна на постійному рівні[7].

Переваги:

- плавний пуск;
- можливість роботи на низькій швидкості.

Недоліки:

- Складна система управління;
- Необхідність постійного виміру сигналів з датчиків.

Система перетворювач частоти – асинхронний електродвигун.

Головним елементом у схемі частотного управління трифазним асинхронним двигуном М являється блок перетворювача частоти і напруги, ПЧН, на його вхід подається напруга U_1 змінного струму з частотою f_1 . Управління роботою ПЧН відбувається завдяки сигналу керування U_k , який надходить із КП, керуючого пристрою. Від значення керуючого сигналу залежать величина значення напруги $U_{\text{вих}}$ і частоти $f_{\text{вих}}$ на виході ПЧН. Трифазна напруга $U_{\text{вих}}$, в необхідному співвідношенні з частотою $f_{\text{вих}}$, після того як подається на обмотку статора двигуна М, забезпечує задані значення частоти обертання n_2 , а також обертаючого моменту М двигуна[10].

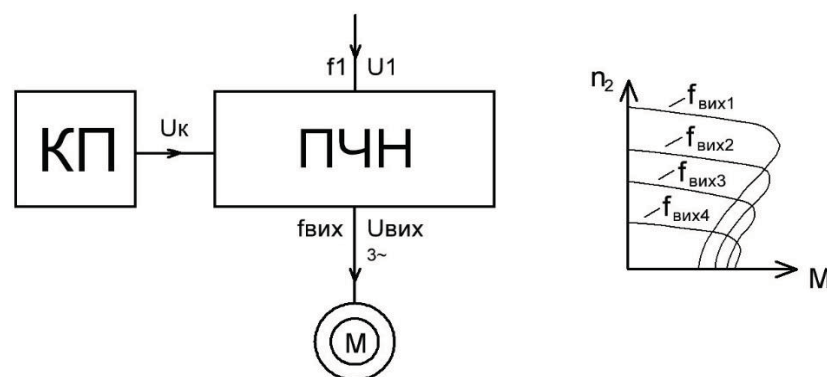


Рисунок 1.2 - Механічні характеристики і структурна схема асинхронного двигуна при частотному управлінні[10]

При частотному управлінні асинхронним двигуном жорсткість його механічних характеристик залишається незмінною. Невелике пониження максимального моменту (перевантажувальної здатності) двигуна при істотному

зменшенні частоти $f_{\text{вих}}$ виникає через активний опір обмотки статора. Такий компенсується збільшенням підведеної напруги до ПЧН, і тоді максимальний момент двигуна у всьому діапазоні регулювання частоти не змінюється.

Сучасні пристрої з частотним управлінням переважно використовують статичні перетворювачі напруги і частоти побудовані на безконтактних елементах, переважно - на тиристорах. Такі перетворювачі працюють за принципом перетворення трифазного змінного струму в постійний, а після цього перетворенням постійний струм в змінний струм заданої частоти. На рис. 1.8 зображено структурну схему для розімкненої системи частотного управління електроприводом змінного струму. Керуючий пристрій подає два сигнали на перетворювач напруги і частоти. Сигнал U_u надходить на керований випрямляч КВ (за допомогою його значення визначається величина напруги на виході КВ), а сигнал U_f входить в керований інвертор КІ (його значення визначає частоту змінного струму на виході з КІ). Зворотній зв'язок за частотою обертання забезпечує найбільше значення жорсткості механічних характеристик керованого двигуна.

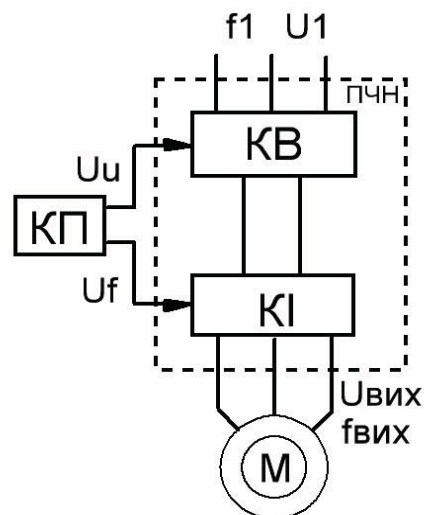


Рисунок 1.3 – Структурна схема розімкненої системи частотного управління асинхронним двигуном[10]

Переваги:

- Забезпечення плавного старту і плавне обертання двигуна на всьому діапазоні частот;
- Зниження втрат на нагріві і намагнічуванні, а також підвищення ККД електродвигуна.
- Забезпечення високої точності регулювання швидкості;
- Збільшений діапазон керування і точність регулювання;
- Забезпечення швидкої реакції на зміну навантаження, тобто через зміну навантаження майже не відбувається змін швидкості;

Недоліки:

- Велика складність для обчислення;
- Необхідність завдання параметрів електродвигуна;
- Значні коливання швидкості при постійному навантаженні.

Обґрунтування і вибір системи електропривода. Оскільки внаслідок розвитку сучасної електротехніки асинхронні електроприводи стають дешевшими в експлуатації, а отже і більш конкурентоспроможними порівняно з двигунами постійного струму. Самим популярним типом електроприводу завдяки своїм простоті і невеликим капіталовкладенням являється асинхронний електродвигун з коротко замкнутим ротором. Такі двигуни успішно застосовуються для пуску підвісних канатних доріг, що в свою чергу дозволяє забезпечити плавний пуск системи підвісної канатної дороги та надає значної переваги – можливість руху на низькій швидкості. Вибір цих двигунів дає змогу обмижити пускові струми і забезпечує формування необхідної механічної характеристики електроприводу.

Управління механічними координатами двигуна (швидкістю обертання і моментом на валу) в асинхронному електроприводі трьома основними способами:

- за допомогою векторного керування;
- за допомогою зміни амплітуди і значення частоти прикладеної напруги – так зване, скалярне керування;
- за допомогою зміни значення напруги прикладеної до електродвигуна, при цьому частота напруги живлення залишається постійною.

Теоретично, найбільш кращим способом управління координатами електроприводу асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором являється зміна частоти напруги живлення і одночасний вплив на амплітуду напруги. Також, додатковою перевагою векторного керування являється простота реалізації на практиці.

При векторному управлінні асинхронний двигун має можливість живитись як від джерела напруги, так і джерела струму. Найбільш розповсюдженим варіантом являється частотно-струмове векторне керування, оскільки під час регулювання струму незалежно від частоти живлення асинхронного двигуна також забезпечується і регулювання моменту АД. Це надає змогу спростити схему керування, а й водночас з тим обмежує перегрів двигуна. При цьому напруги на обмотках статора асинхронного двигуна створюються автоматично залежно від режиму в якому він працює. Формування моменту АД можливо відпрацюванням при абсолютних значеннях векторів струмів і векторів потокозчеплень. Векторний спосіб керування якнайкраще підходить для того щоб забезпечити задану частоти обертання. Окрім того, дає змогу тримати стабільну швидкість під час пуску електродвигуна. Важливим являється той факт, що при використанні векторного управління зберігається більша кількість енергії завдяки тому, що частотний перетворювач подає до двигуна рівно стільки енергії, скільки потрібно для підтримання заданого значення швидкості [6].

Отже, на основі всіх наданих переваг, разом з нескладною системою управління електроприводом всі вище зазначені переваги у поєднанні з досить не складною та сучасною системою керування електроприводом надають нам цілком вагомі причини для вибору системи асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором – частотний перетворювач, для створення привідної станції в системі підвісної канатної дороги.

Висновки до першого розділу:

На основі проведеного аналізу режимів роботи і конструкцій підвісних канатних доріг сформовані вимоги до електроприводів цих систем. В результаті

розгляду варіантів систем електроприводів, відповідаючих вимогам технологічного процесу була відібрана, як найбільш раціональна система електроприводу з використанням векторно-керованого електродвигуна. Отримані результати дають можливість провести розрахунок і вибір елементів електромеханічної системи.

РОЗДІЛ 2.

РОЗРАХУНОК ТА ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОСИЛОВОГО КОНТУРУ

2.1 Розрахунок потужності та вибір електродвигуна

Вхідні параметри для розрахунку нажані в таб. 2.1.

Таблиця 2.1 – Вхідні дані для розрахунку

Продуктивність P , крісел/год	400
Вага підвіски з кріслом m_n , кг	100
Кут обхвату натяжного барабана α_n , градуси	180
Кут обхвату приводного барабана α_n , градуси	180
Довжина ділянки 1-2 – l_{12}	25
Довжина ділянки 2-3 – l_{23} , м	250
Довжина ділянки 3-4 – l_{34} , м	25
Довжина ділянки 4-5 – l_{45} , м	100
Довжина ділянки 5-6 – l_{56} , м	50
Довжина ділянки 6-7 – l_{67} , м	200
Довжина ділянки 7-8 – l_{78} , м	50
Довжина ділянки 9-10 – l_{910} , м	50
Довжина ділянки 10-11 – l_{1011} , м	200
Довжина ділянки 11-12 – l_{1112} , м	50
Довжина ділянки 12-13 – l_{1213} , м	100
Довжина ділянки 13-14 – l_{1314} , м	25
Довжина ділянки 14-15 – l_{1415} , м	250
Довжина ділянки 15-16 – l_{1516} , м	50
Кут нахилу до горизонту ділянки 2-3 – β_{23} , градуси	30
Кут нахилу до горизонту ділянки 14-15 – β_{1415} , градуси	30

Кут нахилу до горизонту ділянки 6-7 – β_{67} , градуси	15
Кут нахилу до горизонту ділянки 10-11 – β_{1011} , градуси	15
Коефіцієнт опору на роликів та поворотних опорах k_1	1,055
Коефіцієнт опору кареток на горизонтальній ділянці ω	0,027
Коефіцієнт опору на вертикальному вигині φ_1	1,024
Коефіцієнт опору на вертикальному вигині φ_2	1,017
Коефіцієнт опору на вертикальному вигині φ_3	1,024
Висота першого підйому h_1 , м	300
Висота другого підйому h_2 , м	100
Висота третього підйому h_3 , м	200

Структурна схема траєкторії пасажирської двоканатної підвісної дороги зображена нижче на рис. 2.1.

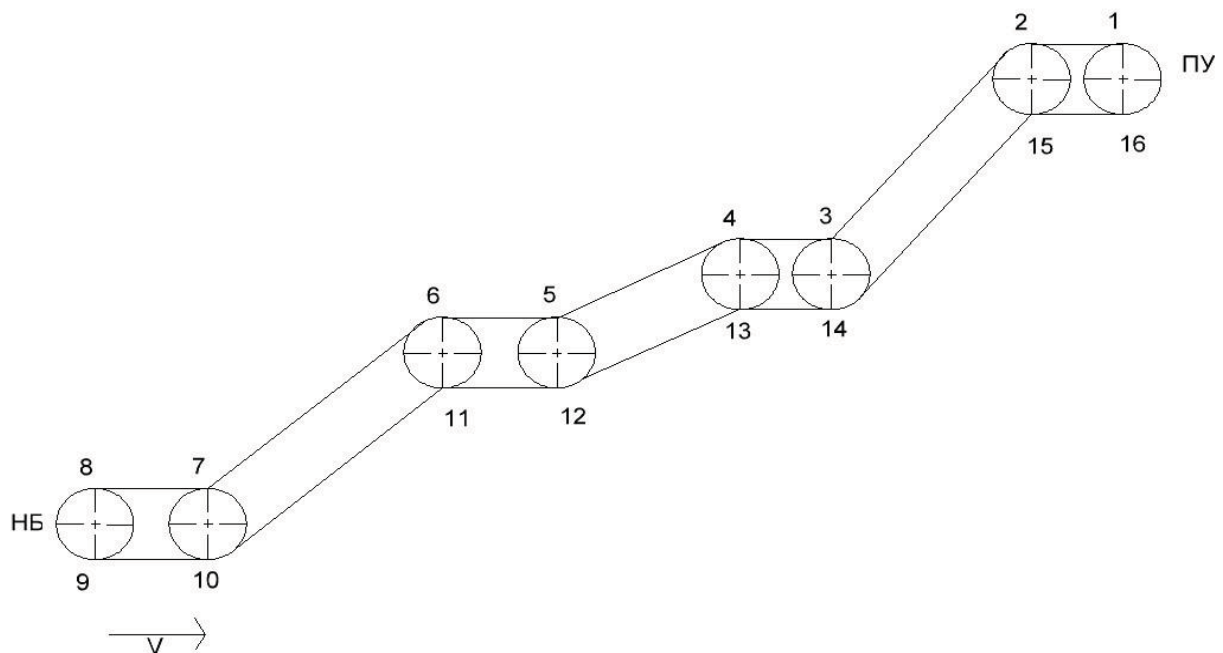


Рисунок 2.1 – Схематична структура підвісної канатної дороги

Виходячи з рекомендацій [2] та беручи до уваги довжину траси, а також складність її конфігурації, було обрано тяговий канат типу 6x19+1 ЛК-Р

(ГОСТ2688-55) з діаметром 25 мм, і розривним зусиллям - 36550 кг. Погонна вага канату $q_k=2.39$ кг/м [6].

Згідно продуктивності, що було задано, можна визначити мінімальний крок підвіски:

$$t_{п.мин} = \frac{a_{max} + \Delta}{\cos\beta} = \frac{3000+9000}{\cos30} = 13,9(м), \quad (2.1)$$

де $a_{max}=3000м$ - максимальна довжина крісла з людиною[2];

$\Delta = 9000$ - рекомендована додаткова відстань між двома підвісками [2];

$\cos\beta$ - значення найбільшого кута нахилу на ділянках вигину в вертикальній площині[2].

Оскільки, поставлена умова $t_{п} \geq t_{п.мин}$ [2], крок підвіски прийнято рівний $t_{п}=20(м)$.

Вирахуємо швидкість руху крісла підвісної канатної дороги, слідкуючи щоб виконувалась задана продуктивність та беручи до уваги обраний крок підвіски.

$$v = \frac{\Pi \cdot t_{п}}{3600} = \frac{400 \cdot 20}{3600} = 2,22(м/с) \quad (2.2)$$

Враховуючи обставини цього року, прийнято рішення, використовувати ці крісла для перевезення лише одного пасажирів або лижника.

Вирахуємо погонну масу рухомих елементів. Вага незавантаженої ділянки дороги становитиме:

$$q_0 = m_k + \frac{m_{п}}{t_{п}} = 2,39 + \frac{100}{20} = 7,39 \text{ кг/пог.м.}, \quad (2.3)$$

де $m_{п}$ - маса підвіски, m_k - маса крісла.

Маса завантаженої ділянки дороги буде дорівнювати:

$$q = q_0 + \frac{m_3}{t_{п}} = 7,39 + \frac{90}{20} = 11,89 \text{ кг/пог.м.}, \quad (2.4)$$

де m_3 - середня вага людини, 90 кг.

Наступним кроком визначимо натяг канату на усіх проміжках системи підвісної канатної дороги.

Виходячи з аналізу режиму роботи системи найменший натяг канату в замкнутому контурі траси підвісної канатної дороги матимемо в точці 9[2]. Адже саме ця точка являється самою низькою і після неї починається посадка пасажирів.

$$S_9 = S_{\min} = (q_0 + m_3) \cdot g = (7.39 + 90) \cdot 9.81 = 954.4 \text{ Н}, \quad (2.5)$$

Де $g = 9.81 \text{ м/с}^2$.

Виконаємо розрахунок натягу канату по всьому замкненому контуру траси:

$$S_{10} = S_9 + q \cdot l_{910} \cdot \omega \cdot g = 954.42 + 11.89 \cdot 50 \cdot 0.027 \cdot 9.81 = 1.11 \cdot 10^3 \text{ (Н)} \quad (2.6)$$

$$S_{11} = \varphi_1 \cdot (\varphi_1 \cdot S_{10} + \omega \cdot q \cdot l_{1011} \cdot g + q \cdot h_1 \cdot g) = 1.024 \cdot (1.024 \cdot 1.11 \cdot 10^3 + 0.027 \cdot 11.89 \cdot 200 \cdot 9.81 + 11.89 \cdot 300 \cdot 9.81) = 3.761 \cdot 10^4 \text{ (Н)} \quad (2.7)$$

$$S_{12} = S_{11} + q \cdot l_{1112} \cdot \omega \cdot g = 3.761 \cdot 10^4 + 11.89 \cdot 50 \cdot 0.027 \cdot 9.81 = 3.776 \cdot 10^4 \text{ (Н)} \quad (2.8)$$

$$S_{13} = \varphi_2 \cdot (\varphi_2 \cdot S_{12} + \omega \cdot q \cdot l_{1213} \cdot g + q \cdot h_2 \cdot g) = 1.017 \cdot (1.017 \cdot 3.776 \cdot 10^4 + 0.027 \cdot 11.89 \cdot 100 \cdot 9.81 + 11.89 \cdot 100 \cdot 9.81) = 5.123 \cdot 10^4 \text{ (Н)} \quad (2.9)$$

$$S_{14} = S_{13} + q \cdot l_{1314} \cdot \omega \cdot g = 5.123 \cdot 10^4 + 11.89 \cdot 25 \cdot 0.027 \cdot 9.81 = 5.131 \cdot 10^4 \text{ (Н)} \quad (2.10)$$

$$S_{15} = \varphi_3 \cdot (\varphi_3 \cdot S_{14} + \omega \cdot q \cdot l_{1415} \cdot g + q \cdot h_3 \cdot g) = 1.024 \cdot (1.024 \cdot 5.131 \cdot 10^4 + 0.027 \cdot 11.89 \cdot 250 \cdot 9.81 + 11.89 \cdot 200 \cdot 9.81) = 7.847 \cdot 10^4 \text{ (Н)} \quad (2.11)$$

$$S_{16} = S_{15} + q \cdot l_{1516} \cdot \omega \cdot g = 7.847 \cdot 10^4 + 11.89 \cdot 25 \cdot 0.027 \cdot 9.81 = 7.863 \cdot 10^4 \text{ (Н)} \quad (2.12)$$

Натяг канату в точках $S_8 - S_1$ знову ж так має сенс розраховувати від точки 8 до точки 1.

$$S_8 = S_9 / k_1 = 954.4 / 1.055 = 904.66 \text{ (Н)} \quad (2.13)$$

$$S_7 = S_8 - \omega \cdot q_0 \cdot l_{78} \cdot g = 904.66 - 0.027 \cdot 7.39 \cdot 50 \cdot 9.81 = 806.9 \text{ (Н)} \quad (2.14)$$

$$S_6 = 1/\varphi_1 \cdot (1/\varphi_1 \cdot S_7 - q_0 \cdot l_{67} \cdot \omega \cdot g + q_0 \cdot h_1 \cdot g) = 1/1.024 \cdot (1/1.024 \cdot 806.9 - 7.39 \cdot 200 \cdot 0.027 \cdot 9.81 + 7.39 \cdot 300 \cdot 9.81) = 2.16 \cdot 10^4 \text{ (H)} \quad (2.15)$$

$$S_5 = S_6 - \omega \cdot q_0 \cdot l_{56} \cdot g = 2.16 \cdot 10^4 - 7.39 \cdot 50 \cdot 0.027 \cdot 9.81 = 2.151 \cdot 10^4 \text{ (H)} \quad (2.16)$$

$$S_4 = 1/\varphi_2 \cdot (1/\varphi_2 \cdot S_5 - q_0 \cdot l_{45} \cdot \omega \cdot g + q_0 \cdot h_2 \cdot g) = 1/1.017 \cdot (1/1.017 \cdot 2.151 \cdot 10^4 - 7.39 \cdot 100 \cdot 0.027 \cdot 9.81 + 7.39 \cdot 100 \cdot 9.81) = 2.77 \cdot 10^4 \text{ (H)} \quad (2.17)$$

$$S_3 = S_4 - \omega \cdot q_0 \cdot l_{34} \cdot g = 2.77 \cdot 10^4 - 0.027 \cdot 7.39 \cdot 25 \cdot 9.81 = 2.767 \cdot 10^4 \text{ (H)} \quad (2.18)$$

$$S_2 = 1/\varphi_3 \cdot (1/\varphi_3 \cdot S_3 - q_0 \cdot l_{23} \cdot \omega \cdot g + q_0 \cdot h_3 \cdot g) = 1/1.024 \cdot (1/1.024 \cdot 2.767 \cdot 10^4 - 7.39 \cdot 250 \cdot 0.027 \cdot 9.81 + 7.39 \cdot 200 \cdot 9.81) = 4.006 \cdot 10^4 \text{ (H)} \quad (2.19)$$

$$S_1 = S_2 - \omega \cdot q_0 \cdot l_{12} \cdot g = 4 \cdot 10^4 - 0.027 \cdot 7.39 \cdot 25 \cdot 9.81 = 4.001 \cdot 10^4 \text{ (H)} \quad (2.20)$$

Базуючись на проведених розрахунках побудовано діаграму натягу тягового елемента підвісної канатної дороги, яка приведена на рис. 2.2:

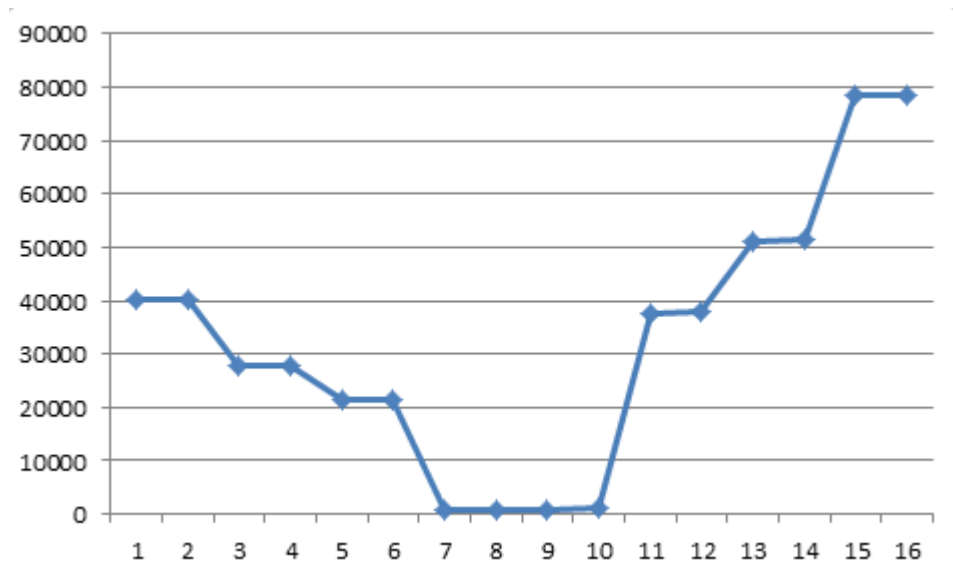


Рисунок 2.2 – Діаграма натягу підвісної канатної дороги

Далі буде визначено тягове зусилля безпосередньо на зірочці привідної станції[2]:

$$w_0 = S_{16} - S_1 + (k_1 - 1) \cdot (S_{16} + S_1) = 7.863 \cdot 10^4 - 4.001 \cdot 10^4 + (1.055 - 1) \cdot (7.863 \cdot 10^4 + 5.404 \cdot 10^4) = 4.514 \cdot 10^4 \text{ (H)} \quad (2.21)$$

Потужність електроприводу системи підвісної канатної дороги розраховується за наступною формулою[2]:

$$P_p = \frac{w_0 \cdot v}{\eta} = \frac{4.514 \cdot 10^4 \cdot 2.22}{0,9} = 111.5 \text{ (кВт)} \quad (2.22)$$

Також, обов'язково слід врахувати коефіцієнт випадкових збурень та динамічної складової - $\kappa_{\eta} = 1,15$, [2], тоді потужність становитиме:

$$P_0 = \kappa_{\eta} \cdot P_p = 1,15 \cdot 111.5 = 128.2 \text{ (кВт)} \quad (2.23)$$

Базуючись на отриманих вище результатах розрахунків натягу та необхідної потужності, та приймаючи до уваги можливі зміни погодних умов обрано асинхронний електродвигун з фазним ротором типу 4A315M4Y3 [8] номінальна потужність якого складає 200 (кВт) а інші його параметри приведені в таблиці 2.2.

Двигуни серії 4A в повній мірі задовольняють рекомендаціям МЕК (Міжнародної електротехнічної комісії) щодо габаритних і установочно-приєднувальних розмірів, що забезпечує їх взаємозамінність з електричними машинами, виготовленими фірмами інших країн світу. Завдяки використанню більш досконалих електротехнічних матеріалів, нових конструктивних рішень і більш досконалої технології двигуни цієї серії володіють більшою надійністю і експлуатаційними зручностями, ніж двигуни серії A2. За цими показниками і за основними технічними даними двигуни знаходяться на рівні світових стандартів [8].

Серія 4A передбачає основне виконання і практично, а також всі електричні модифікації і спеціалізовані виконання трифазних асинхронних електродвигунів серії A2 і AO2 і додаткове спеціалізоване виконання електродвигунів з вбудованим температурним захистом. В основному виконанні двигуни призначаються для загального застосування в промисловості в умовах помірного клімату. (Кліматичного виконання У категорій 3 і 4).

Середовище повинне бути невибухонебезпечне, яке не містить агресивних газів і парів, що руйнують метали і ізоляцію, і без струмопровідного пилу.

У електродвигунів серії 4А потужністю від 0,12 до 400 кВт (при 1500 об/хв) висота осі обертання від 56 до 355 мм. Електродвигуни з висотою обертання 56 і 63 мм виконуються в алюмінієвому корпусі, а з висотою 71-355 мм - в чавунному. Вали і підшипники (кочення) розраховані на застосування клиноременною і зубчастою передач [8].

Обмотку статора електродвигунів з висотою осі обертання 56-250 мм виконують всипною; з висотою осі обертання 280-355 мм - з жорстких секцій. Короткозамкнуту клітку ротора відливають з алюмінію [8].

Таблиця 2.2 – Паспортні дані двигуна 4А315М4У3 [8]

Номінальна потужність	$P_{2n} = 200(\text{кВт})$
Номінальна частота обертання	$n = 1500(\text{об} / \text{хв})$
Коефіцієнт корисної дії	$\eta = 0,94$
Коефіцієнт потужності	$\cos \varphi = 0,92$
Перевантажувальна здатність	$\lambda = 2$
Номінальне ковзання	$s_n = 1(\%)$
Номінальна частота напруги статора	$f = 50(\text{Гц})$

2.2 Розрахунок редуктора

Оберемо привідний барабан з діаметром 1 м [2].

Розрахунок передаточного числа редуктора відбувається за наступною формулою[2]:

$$i_p = \frac{D \cdot n_n \cdot \pi}{60 \cdot V} = \frac{1 \cdot 1500 \cdot 3.14}{60 \cdot 2.2} = 35.3 \quad (2.24)$$

Передатне число обираємо з ряду стандартних передатних чисел редуктора [8] $i_p = 36$.

Для остаточного рішення проведемо перевірку обраного двигуна за пусковим моментом:

Розрахунок необхідного моменту навантаження для руху підвісної канатної дороги[2]:

$$M_{сн} = \frac{w_0 \cdot D}{2 \cdot i_p} = \frac{4.514 \cdot 10^4 \cdot 1}{2 \cdot 36} = 626.9 H \cdot м \quad (2.25)$$

Наступним кроком проведемо розрахунок номінального моменту двигуна[2]:

$$M_H = \frac{P_D \cdot 30}{n_n \cdot \pi} = \frac{200000 \cdot 30}{1500 \cdot 3.14} = 1273 H \cdot м \quad (2.26)$$

Здійснимо перевірку обраного двигуна[8]:

$$\begin{aligned} M_H &\geq M_{сн} \\ 1273 &\geq 626.9 H \cdot м \end{aligned} \quad (2.27)$$

Судячи з нерівності (2.27) обраний двигун задовольняє умови по пусковому моменту.

Далі буде проведено перевірку за перевантажувальною здатністю.

Приймаючи до уваги те, що в мережі можлива присутність коливань напруги, які становлять 10%, після цього мінімальний момент двигуна становитиме 0.8 від номінального значення:

$$M_{c_max} = k_z \cdot M_{сн} = 1.3 \cdot 626.9 = 815 H \cdot м \quad (2.28)$$

Виконаємо порівняння максимального пускового моменту з номінальним моментом для остаточної перевірки[8]:

$$\begin{aligned} 0.8 \cdot \lambda \cdot M_H &\geq M_{c_max} \\ 0.8 \cdot 2 \cdot 1273 &\geq 815 H \cdot м \\ 2073 &\geq 815 H \cdot м \end{aligned} \quad (2.29)$$

Результати порівняння значать, що обраний електродвигун підходить по перевантажувальній здатності.

Висновки до другого розділу

Беручи за основу результати розрахунку потужності електроприводу в якості електродвигуна в системі підвісної канатної дороги обрано двигун серії 4A315M4Y3 потужністю 200 кВт. та вертикальний циліндричний редуктор з

передатним числом $i_p = 36$. Результати отримані в цьому розділі дозволяють забезпечити коректний подальший вибір силових елементів електромеханічної системи та допоможуть вирішити задачу створення математичної моделі для системи підвісної канатної дороги.

РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ

3.1 Розрахунок параметрів номінального режиму та схеми заміщення асинхронного двигуна

Більш розгорнуті паспортні дані обраного двигуна типу 4А315М4У3 надані в таблиці 3.1 [8].

Таблиця 3.1 - Паспортні дані двигуна 4А315М4У3 [8]

Номінальна потужність	$P_{2n} = 200 \text{ кВт}$
Номінальна лінійна напруга статора	$U_{1n} = 380/660 \text{ В}$
Число пар полюсів	$p_n = 2$
Момент інерції	$J_d = 3.6 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$
Коефіцієнт корисної дії	$\eta = 0.94$
Коефіцієнт потужності	$\cos \varphi = 0.92$
Перевантажувальна здатність	$\lambda = 2$
Номінальне ковзання	$s_n = 1\%$
Критичне ковзання	$s_k = 4\%$
Номінальна частота напруги статора	$f = 50 \text{ Гц}$
Параметри Г-подібної схеми заміщення (відносні одиниці)	
Індуктивний опір розсіювання статора	$\overline{X_1} = 0.086$
Активний опір статора	$\overline{R_1} = 0.014$
Приведений індуктивний опір розсіювання ротора	$X_2'' = 0.12$
Приведений активний опір ротора	$R_2'' = 0.014$
Індуктивний опір намагнічуючого контуру	$X_\mu = 4.1$

За наступною формулою розраховуємо кутову частоту напруги статора[7]:

$$\omega_0 = 2\pi f; \omega_0 = 2 \cdot 3.14 \cdot 50 = 314.159 (\text{рад} / \text{с}) \quad (3.1)$$

Наступним кроком розрахуємо швидкість ідеального холостого ходу двигуна[7]:

$$\omega_{xx} = \frac{\omega_0}{p}; \omega_{xx} = \frac{314.159}{2} = 157.08 (\text{rad} / \text{c}) \quad (3.2)$$

де p – це кількість пар полюсів двигуна.

Номінальна швидкість двигуна вираховується по наступній формулі[7]:

$$\omega_n = \omega_{xx} (1 - S_n); \omega_n = 157.08 (1 - 0.0099) = 155.525 (\text{rad} / \text{c}) \quad (3.3)$$

На базі цих розрахунків знаходимо номінальний момент двигуна [7]:

$$M_n = \frac{P_{2n}}{\omega_n}; M_n = \frac{200000}{155.5} = 1286 (\text{Hm}) \quad (3.4)$$

Знайдемо критичне значення моменту двигуна (по перевантажувальній здатності λ) [7]:

$$M_k = \lambda M_n; M_k = 2 \cdot 1286 = 2572 (\text{Hm}) \quad (3.5)$$

Далі вирахуємо номінальні діючі значення струму статора та фазної напруги [7]:

$$U_n = \frac{U_l}{\sqrt{3}}; U_n = \frac{660}{\sqrt{3}} = 381.051 (\text{B}) \quad (3.6)$$

$$I_n = \frac{P_{2n}}{3 \cdot U_n \cdot \eta \cdot \cos \phi}; I_n = \frac{200000}{3 \cdot 381 \cdot 0.94 \cdot 0.92} = 201.236 (\text{A}) \quad (3.7)$$

А також амплітудні значення фазної напруги і струму статора, які розраховуються за наступною формулою[7]:

$$\begin{aligned} U_{na} &= \sqrt{2} \cdot U_n; U_{na} = \sqrt{2} \cdot 381.051 = 538.89 (\text{B}) \\ I_{na} &= \sqrt{2} \cdot I_n; I_{na} = \sqrt{2} \cdot 201.236 = 284.59 (\text{A}) \end{aligned} \quad (3.8)$$

Далі розрахуємо амплітудне значення потокозчеплення статора на холостому ході[7]:

$$\psi_{xx} = \frac{U_{na}}{\omega_0}; \psi_{xx} = \frac{538.89}{314} = 1.715 (\text{Bб}) \quad (3.9)$$

3.2 Розрахунок параметрів Т-подібної схеми заміщення параметрів електродвигуна

Наведемо математичну модель асинхронного двигуна, враховуючи параметри Т-подібної схеми заміщення на рис. 3.1. Після цього приведемо параметри, які відповідають Г-подібній схемі заміщення та зобразимо їх на рис. 3.2.[11]

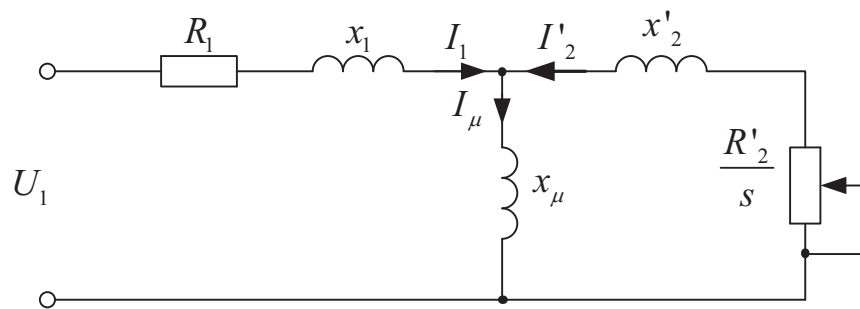


Рисунок 3.1. - Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна [11]

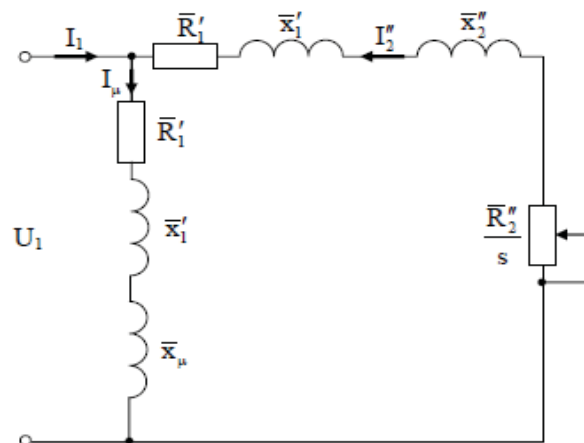


Рисунок 3.2- Г-подібна схема заміщення асинхронного двигуна [11]

Виразуємо коефіцієнт який допомагає здійснювати перетворення параметрів АД між Т-подібною та Г-подібною схемами:[11]

$$c_1 = \frac{x\mu + \sqrt{x\mu^2 + 4x\mu \cdot x'_1}}{2x\mu}; c_1 = \frac{4.1 + \sqrt{4.1^2 + 4 \cdot 4.1 \cdot 0.086}}{2 \cdot 4.1} = 1.021 \quad (3.10)$$

Звідси виведемо параметри Т-подібної схеми заміщення у відносних одиницях [11]:

$$\begin{aligned}\bar{x}_1 &= \frac{\bar{x}'_1}{c_1} = \frac{0.086}{1.021} = 0.084 & \bar{R}_1 &= \frac{\bar{R}'_1}{c_1} = \frac{0.014}{1.021} = 0.014 \\ \bar{x}'_2 &= \frac{\bar{x}''_2}{c_1^2} = \frac{0.12}{1.021^2} = 0.115 & \bar{R}'_2 &= \frac{\bar{R}''_2}{c_1^2} = \frac{0.014}{1.021^2} = 0.013\end{aligned}\quad (3.11)$$

Виходячи з попередніх розрахунків параметри Т-подібної схеми заміщення в абсолютних одиницях запишемо наступним чином[11]:

$$\begin{aligned}x_{1a} &= \frac{x_1 Un}{In}; x_{1a} = \frac{0.086 \cdot 381.051}{284.591} = 0.163(Ом); \\ R_{1a} &= \frac{R_1 Un}{In}; R_{1a} = \frac{0.014 \cdot 381.051}{284.591} = 0.027(Ом); \\ x_{2a}' &= \frac{x_2' Un}{In}; x_{2a}' = \frac{0.12 \cdot 381.051}{284.591} = 0.227(Ом); \\ R_{2a} &= \frac{R_2' Un}{In}; R_{2a} = \frac{0.014 \cdot 381.051}{284.591} = 0.027(Ом); \\ x_{\mu a} &= x_{\mu} \frac{Un}{In}; x_{\mu a} = 4.1 \cdot \frac{381.051}{284.591} = 7.764(Ом)\end{aligned}\quad (3.12)$$

З отриманих даних виведемо значення індуктивностей розсіювання статора та ротора[11]:

$$\begin{aligned}L_{1\sigma} &= \frac{x_{1a}}{\omega_0}; L_{1\sigma} = \frac{0.163}{314.159} = 5.184 \cdot 10^{-4} (Гн); \\ L_{2\sigma} &= \frac{x_{2a}'}{\omega_0}; L_{1\sigma} = \frac{0.227}{314.159} = 7.233 \cdot 10^{-4} (Гн);\end{aligned}\quad (3.13)$$

А також запимешо індуктивність намагнічуючого контуру[11]:

$$L_{\mu} = \frac{x_{\mu a}}{\omega_0}; L_{\mu} = \frac{7.764}{314.159} = 0.025(Гн); \quad (3.14)$$

Тоді значення індуктивностей статора і ротора набуватимуть вигляду[11]:

$$\begin{aligned}L_1 &= L_{\mu} + L_{1\sigma}; L_1 = 0.025 + 5.184 \cdot 10^{-4} = 0.025(Гн); \\ L_2 &= L_{\mu} + L_{2\sigma}; L_2 = 0.025 + 7.233 \cdot 10^{-4} = 0.025(Гн);\end{aligned}\quad (3.15)$$

Беручи за основу попередні розрахунки обчислюємо значення параметрів $\alpha, \alpha_1, \beta, \gamma, \sigma$ [11]:

$$\alpha = \frac{R_2}{L_2}; \alpha = \frac{0.014}{0.025} = 0.55 \text{ (Ом / Гн)};$$

$$\alpha_1 = \frac{R_1}{L_1}; \alpha_1 = \frac{0.014}{0.022} = 0.555 \text{ (Ом / Гн)};$$
(3.16)

$$\sigma = \frac{(L_1 \cdot L_2 - L_\mu^2)}{L_2}; \sigma = \frac{(0.025 \cdot 0.025 - 0.025^2)}{0.025} = 1.221 \cdot 10^{-3} \text{ (Гн)};$$

$$\beta = \frac{L_\mu}{L_2 \cdot \sigma}; \beta = \frac{0.025}{0.025 \cdot 1.221 \cdot 10^{-3}} = 795.6 \text{ (1 / Гн)};$$

$$\gamma = \frac{R_1}{\sigma} + \alpha \cdot L_\mu \cdot \beta; \gamma = \frac{0.014}{1.221 \cdot 10^{-3}} + 0.55 \cdot 0.025 \cdot 795.6 = 22.28 \text{ (Ом / Гн)};$$

$$\mu = 1.5 \cdot \frac{L_\mu}{L_2 \cdot p_n}; \mu = 1.5 \cdot \frac{0.025}{0.025 \cdot 2} = 0.729;$$
(3.17)

В результаті розрахунків отримано параметрів двигуна 4А315М4У3 і заведено їх в таблицю 3.2.

Таблиця 3.2 - Параметри двигуна 4А315М4У3

ω_{xx} , рад/с	157.08	R_1 , Ом	0.014
ω_n , рад/с	155.525	R_2 , Ом	0.014
M_n , Нм	1286	L_1 , Гн	0.02515
M_k , Нм	2572	L_2 , Гн	0.02525
λ	2	L_μ , Гн	0.02534
I_{na} , А	284.59	α , Ом/Гн	0.55
ψ_{1xx} , Вб	1.715	α_1 , Ом/Гн	0.555
γ , Ом/Гн	22.288	μ	0.729
σ , Гн	0.001221	β , 1/Гн	795.6

3.3 Вибір елементів схеми керування

Приведемо типову функціональну схему для електроприводу змінного струму на рис 3.3. Електропривід базується на основі перетворювача частоти який містить ланку постійного струму. В основі асинхронного електроприводу лежить перетворювач частоти, що, в свою чергу, поєднує в собі керуючий пристрій і перетворювач.

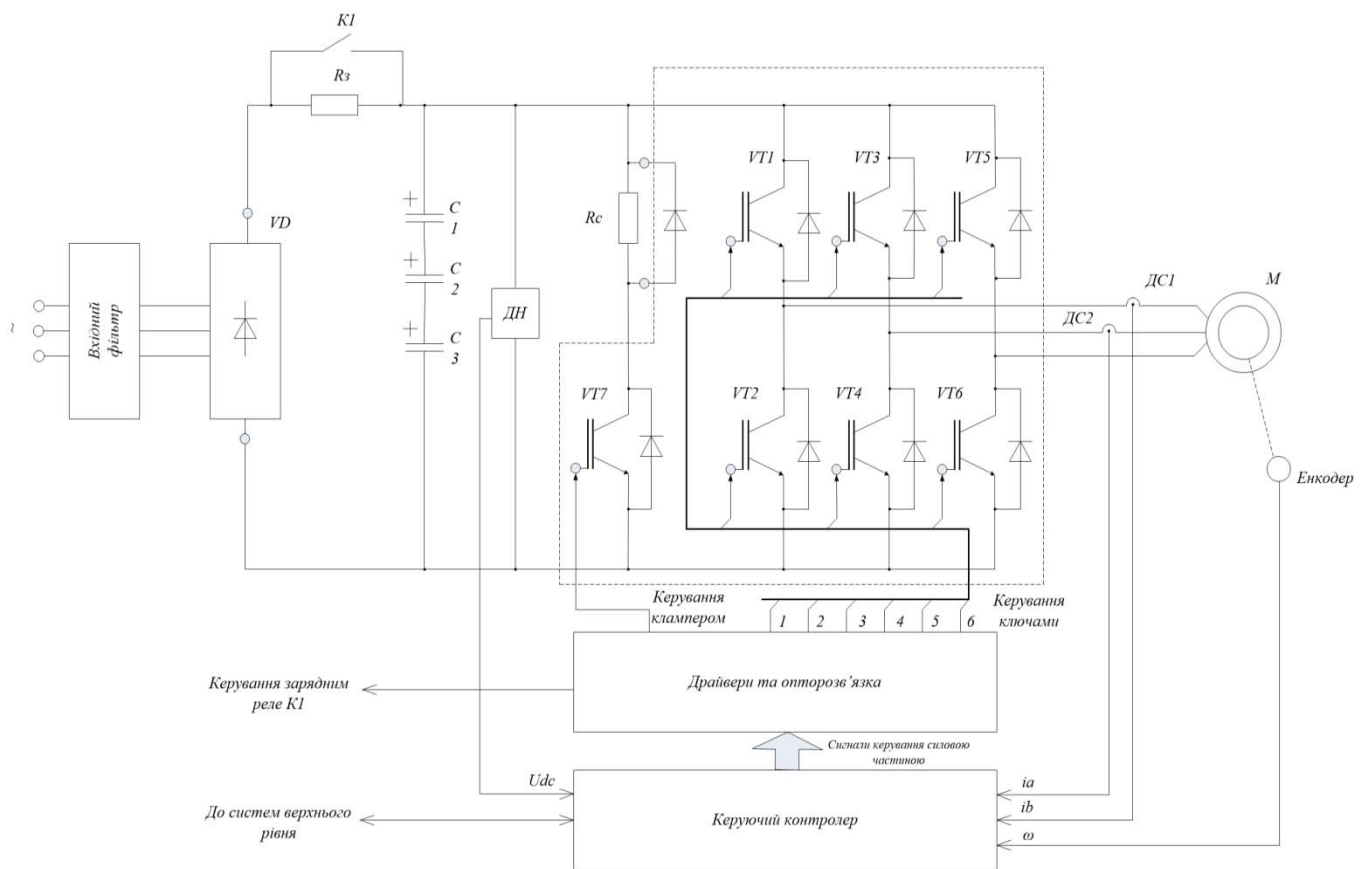


Рисунок 3.3 - Функціональна схема асинхронного електроприводу [11]

В силовій частині перетворювача частоти знаходяться вхідний фільтр, некерований випрямляч, датчики вихідного струму та датчик напруги ланки постійного струму, інвертор, зарядне коло, ємність фільтру випрямляча, схеми драйверів, а також схеми гальванічної розв'язки сигналів керування ключами інвертора та клампера, а також блок живлення[11].

- 1) Панель оператора – пристрій для налаштування параметрів системи, з його допомогою можна подавати команди перетворювача та вводити завдання на регульовану величину в ручному режимі, спостерігає за контрольними величинами та показує діагностику [11].
- 2) Керуючий контроллер, до якого входить, власне, цифровий контроллер [11].
- 3) Випрямляч – пристрій, що використовується для перетворення змінної напруги мережі живлення в постійну напругу[11].
- 4) Фільтр випрямляча – це пристрій, що містить в собі варистори та фільтр радіоперешкод [11].
- 5) Ємність фільтру випрямляча – фільтр, що використовують для згладжуватння випрямленої напруги на виході з випрямляча [11].
- 6) Зарядне коло містить в собі зарядний резистор R_z та реле $K1$ – пристрій для забезпечення плавного заряду ємності для фільтру випрямляча C під час подачі живлення на перетворювач. Після того, як заряд закінчено контакт реле $K1.1$ замикається [11].
- 7) Клампер – це пристрій, що використовується для стабілізації напруги у ланці постійного струму під час роботи двигуна в генераторному режимі, під час якого відбувається рекуперація енергії в ланку постійного струму [11].
- 8) Датчик напруги – пристрій, що передає в керуючий контролер інформацію про напругу ланки U_{dc} , а також генерує імпульси для управління ключами інвертора за законами широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).
- 9) Інвертор – пристрій, який використовується для перетворення постійної напруги в ланці постійного струму у задану значення трифазної напруги на виході перетворювача [11].
- 10) Датчики струму ДС1, ДС2 – це пристрої, що використовуються для передачі даних про значення фазних струмів в керуючий контроллер, а також створює зворотні зв'язки в системі векторного керування [11].

11) Датчик швидкості – пристрій, призначений для вимірювання кутової швидкості (положення) для створення зворотних зв'язків. Також виконує захисні функції в системі векторного керування [11].

12) Драйвери – пристрої, призначені для забезпечення надійного відкриття та замикання IGBT ключів. Фактично драйвери можуть бути підсилювачами сигналів. Часто драйвери використовують для додаткового забезпечення захисту від струмів короткого замикання інвертора [11].

13) Опторозв'язка – пристрій призначений для забезпечення гальванічної розв'язки дискретних сигналів керування, а також для підвищення захисту від завад керуючого контролера і заради запобігання виходу контролеру з ладу під час аварійних режимів [11].

14) Керуючий контролер – виконує всі функції автоматизації перетворювача [11].

15) Схеми узгодження рівнів сигналів та фільтрації – присутні для того, щоб приводити рівень отриманих з датчиків сигналів до рівнів допустимого значення вхідної напруги аналого-цифрового перетворювача керуючого контролера. Схеми фільтрації можуть застосовуватися для підвищення завадостійкості системи керування [11].

16) Блок живлення – пристрій, призначений для забезпечення живлення власних потреб перетворювача [11].

17) Інтерфейс датчика швидкості – пристрій, який використовується для підключення фото-імпульсних датчиків з різними типами інтерфейсів до контролера [11].

18) Зовнішні термінали – пристрої, які використовуються для підключення дискретних входів/виходів до перетворювача та аналогових входів/виходів [11].

Також в схемі використовуються додаткові входи-виходи, для керування додатковими системами, наприклад для контролю спрацювання зарядного реле, включення вентиляторів системи охолодження та ін [10].

Наступним кроком розрахуємо характеристики силових елементів для раніше обраного двигуна 4A315M4Y3.

Мережу приймемо 3-х фазною, з напругою мережі $U_{мер.} = 660 \text{ В}$.

Для визначення максимального значення струму в фазі двигуна необхідно звернути увагу на перевантажувальну здатність електроприводу Кп. Перевантажувальна здатність змінюється в залежності від конкретного типу механізму, а саме: в межах $K_p=(1.1-1.3)$ для турбомеханізмів, $K_p = (1.2-2)$ - для конвеєрів, екструдерів, підйомно-транспортних механізмів, $K_p = (2-3)$ - для високо-динамічних механізмів, таких як роботи, приводи подачі та інші [11].

Приймемо перевантажувальну здатність $K_p=1.5$, та продовжимо розрахунок. Максимальний струм на виході перетворювача визначається за формулою (3.20) [10]. Данні візьмемо з наведених раніше таб. 3.1 і таб. 3.2.

Для початку вирахуємо фазне значення напруги:

$$U_{\phi n} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = \frac{660}{\sqrt{3}} = 381.051 \text{ В} \quad (3.18)$$

де $U_{\text{л}} = 660 \text{ В}$, лінійне значення напруги мережі.

Далі знайдемо номінальне значення струму, а завдяки йому вже розрахуємо максимальне значення струму на виході з перетворювача.

$$I_n = \frac{P_{2n}}{3 \cdot U_n \cdot \eta \cdot \cos \phi}; I_n = \frac{200000}{3 \cdot 381 \cdot 0.94 \cdot 0.92} = 201.236 (\text{А}) \quad (3.19)$$

$$I_{\max} = K_{\text{п}} \cdot \sqrt{2} \cdot I_n = 1.5 \cdot \sqrt{2} \cdot 201.236 = 426.886 \quad (3.20)$$

В сучасних перетворювачах максимальне значення напруги ланки постійного струму визначається за значенням допустимої напруги встановлених електролітичних конденсаторів фільтра, і становить 750 В для перетворювачів оснащених трифазним живленням [10].

При виборі IGBT модулів для автономних інверторів напруги необхідно звернути увагу на той факт, що їх максимально-допустима напруга колектор-емітер повинна становити значення, яке мінімум в 1.5 рази вище, за максимальну напругу в ланці постійного струму[10], тобто:

$$U_{к.е.} > 1.5 \cdot U_{dc} = 1.5 \cdot 750 = 1125 \text{ В} \quad (3.21)$$

Сучасні IGBT транзистори виробляються за стандартним рядом максимальних значень напруг колектор-емітера: 250, 600, 1200, 1700, 3300, 4500, 6500 В [10].

Обирати IGBT транзистор будемо на ресурсах виробників за наступним критерієм:

$$I_c > I_{\max}, U_{ce\max} > U_{к.е.} \quad (3.22)$$

де I_c та $U_{ce\max}$ – значення тривалого струму колектора і напруги колектор-емітер відповідно, які зазначено в паспортних даних IGBT транзистора.

Обов'язковою являється наявність антипаралельного діоду, але діод не вимагає окремого розрахунку, тому що являється вбудованим в корпус транзистора[11].

Виходячи з каталогу виробника, обираємо IGBT модуль типу FF300R12KE3B2HOSA1 з наступними параметрами: $I_c = 440A, U_{к.е.} = 1200B$ [12].

За наступною формулою вирахуємо ємність випрямляча:

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot K_p \cdot m \cdot f \cdot R_0} = \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 0.05 \cdot 3 \cdot 50 \cdot 1.719} = 0.012 \quad (3.23)$$

де K_p – коефіцієнт пульсацій випрямленої напруги, зазвичай, для перетворювачів частоти обирається в діапазоні значень (0.02-0.05), m - кількість фаз випрямляча, R_0 - значення еквівалентного опору навантаження ланки постійного струму, f – значення частоти напруги мережі живлення [11].

Для визначення R_0 розрахуємо значення струму ланки постійного струму з урахуванням перевантаження.

$$I_{dc} = \frac{K_{II} P_n}{U_{dc} \eta_{inv} \eta_{дв}} = \frac{1.5 \cdot 2 \cdot 10^5}{750 \cdot 0.97 \cdot 0.94} = 436.372(A), \quad (3.24)$$

де $\eta_{inv} = 0.97$ – ККД інвертора напруги.

В свою чергу еквівалентний опір навантаження розраховується за наступною формулою[10]:

$$R_0 = \frac{U_{dc}}{I_{dc}} = \frac{750}{436.372} = 1.719 \text{ Ом} \quad (3.25)$$

Розрахункове значення ємності фільтра для $K_p = 0.05$ буде рівне:

$$C = \frac{1}{2\pi \cdot 0.05 \cdot 3 \cdot 50 \cdot 1.719} = 12000 \text{ мкФ} \quad (3.26)$$

Обираємо з каталогу конденсатори типу HCGWA2G503XK283 [13] ємністю $C = 50000$ мкФ і максимальною напругою 400 В. Необхідні значення ємності і робочої напруги фільтра досягаються завдяки послідовному включенні чотирьох конденсаторів і двох паралельних гілок. Враховуючи ці умови сумарна ємність становитиме $C = \frac{C_c}{4} = \frac{50000}{4} = 12500 \text{ мкФ}$.

З каталогу виробника оберемо діодний модуль типу R7001204XXUA, з наступними параметрами $U_{dc} = 1200 \text{ В}$, $I_{vd} = 450 \text{ А}$ [14].

Розрахуємо зарядний опір:

$$R_3 = 2 \cdot \frac{U_{dc}}{I_{vd}} = 2 \cdot \frac{750}{450} = 3.33 \text{ Ом} \quad (3.27)$$

Зі стандартного ряду резисторів виберемо резистор HSA253R3J в якому $R = 3.3 \text{ Ом}$ [15].

Для того, щоб побудувати канал напруги в ланці постійного струму буде використано датчик типу LEM LV25-P/SP5 [16].

В паспортних даних обраного датчика напруги вказано, що максимальне значення струму первинного ланцюга $I_{p\max} = 6.7 \text{ мА}$. Звідси розраховуємо значення опору резистора R1 за наступною формулою:

$$R_1 = \frac{U_{dc\max}}{I_{p\max}} = \frac{750}{0.0067} = 111940 \text{ Ом} \quad (3.28)$$

Обираємо резистор із ряду стандартних значень $R_1 = 120 \text{ кОм}$.

Для того, щоб виміряти значення струмів на виході з перетворювача використовують значення максимального струму. Для цього оберемо датчик типу

HAL 400-S, значення номінального струму якого становить 400А, а діапазон вимірюваних значень 1000 А.[17]

Під час вибору перетворювача частоти слід приділити увагу значенню електричного струму, яке споживається двигуном, тому що потужність двигуна залежить від максимального значення сили струму.

Виходячи з того, що двигун працює у важких режимах і має розгонятись за короткий проміжок часу, то з великою вірогідністю виникатимуть ситуації, коли двигун зазнаватиме досить значних перевантажень. Як наслідок, можливе виникнення значного зростання струму і досягнення значення вище номінального. Зважаючи на це, при виборі перетворювача частоти слід звернути увагу на його перевантажувальну здатність, а також використовувати частотний перетворювач з потужністю, вищою ніж номінальна потужність двигуна. Перетворювач частоти має підтримувати векторний метод керування, адже цей метод є незамінним у випадках, коли швидке реагування швидкості на зміну навантаження являється необхідним, для того, щоб при різких стрибках навантаження значення швидкості не змінювалось стрибками [11].

Базуючись на розрахунках вище, обираємо перетворювач частоти фірми АВВ типу ACS550-02-368А-4 [18] з паспортними даними, які приведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 [18] – Паспортні данні перетворювача частоти ACS550-02-368А-4

Виробник	ABB
Серія	ACS 550
Потужність	220 кВт
Число фаз/напруга на вході	3-ф/380 В
Число фаз/напруга на виході	3-ф/380 В
Номінальний струм	368 А
ККД перетворювача	98.5%
Векторний режим керування з енкодером	OTAC-01

Векторний режим керування без енкодера	Так
--	-----

Висновки до третього розділу:

В ході цього розділу виконання магістерської роботи було розраховано електричні параметри обраного електродвигуна.

Базуючись на проведених розрахунках обрано перетворювач частоти виробництва компанії ABB серії ACS типу ACS550-02-368A-4, потужність перетворювача становить $P_n=220$ кВт. Обраний перетворювач частоти відповідає всім умовам та повністю сумісний для роботи з електродвигуном 4A315M4У3.

Результати роботи дозволяють в подальшому отримати математичну модель електромеханічної системи підвісної канатної дороги.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ

Приведемо функціональну схему замкнутої системи автоматичного керування для управління підвісною пасажирською канатною дорогою. Схему зображено на рис. 4.1[11].

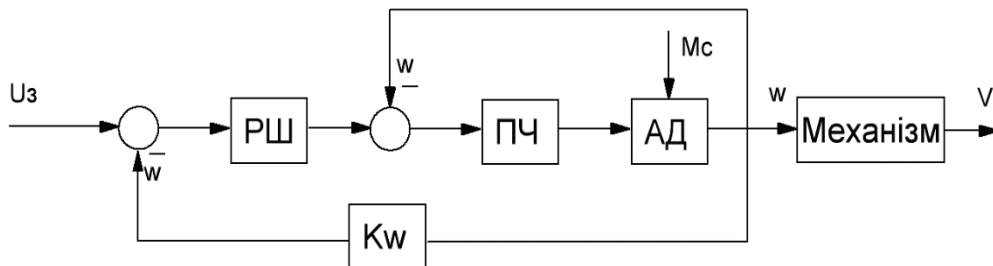


Рисунок 4.1 – Функціональна схема управління підвісною канатною дорогою [11]

В схемі (рис. 4.1) прийнято наступні позначення: РШ – регулятор швидкості; ПЧ – перетворювач частоти; АД – асинхронний електродвигун; M_c – момент статичного навантаження; K_w – коефіцієнт передачі зворотнього зв'язку по швидкості; V – лінійна швидкість переміщення тягового елемента; w – кутова швидкість обертання електродвигуна.

4.1 Система векторного керування асинхронним двигуном

Векторний спосіб керування являється одним з найпоширеніших методів керування синхронними і асинхронними двигунами. Забезпечує не тільки формування гармонійних струмів і напруг фаз (скалярне управління), але й забезпечує керування безпосередньо магнітним потоком двигуна [11].

Для моделювання систем керування АД прийнято використовувати математичну модель, що запишемо її в стаціонарній системі координат $(a-b)$ [11],[19].

$$\begin{aligned}
\dot{\omega} &= \frac{1}{J}(M - M_c) - \nu\omega, \\
M &= \mu(\psi_{2a}i_b - \psi_{2b}i_a), \\
\dot{i}_{1a} &= -\gamma i_{1a} + \alpha\beta\psi_{2a} + \beta p_n\omega\psi_{2b} + \frac{1}{\sigma}u_{1a}, \\
\dot{i}_{1b} &= -\gamma i_{1b} + \alpha\beta\psi_{2b} + \beta p_n\omega\psi_{2a} + \frac{1}{\sigma}u_{1b}, \\
\dot{\psi}_{2a} &= -\alpha\psi_{2a} - p_n\omega\psi_{2b} + \alpha L_m i_{1a}, \\
\dot{\psi}_{2b} &= -\alpha\psi_{2b} - p_n\omega\psi_{2a} + \alpha L_m i_{1b},
\end{aligned} \tag{4.1}$$

де ω – значення кутової швидкості ротора, $(i_{1a}, i_{1b})^T$ – складові вектора струму статора в системі координат $(a-b)$, $(\psi_{2a}, \psi_{2b})^T$ – складові вектора потокозчеплення ротора, $(u_{1a}, u_{1b})^T$ – складові вектора напруги статора, M_c – момент навантаження, ν – коефіцієнт в'язкого тертя. [11],[19],[20]. Додатні значення, які відносяться до електричних і механічних параметрів АД, визначаються наступним чином:

$$\begin{aligned}
\sigma &= L_1 \left(1 - \frac{L_m^2}{L_1 L_2} \right), \\
\beta &= \frac{L_m}{\sigma L_2}, \\
\mu &= \frac{3}{2} p_n \frac{L_m}{J L_2}, \\
\alpha &= \frac{R_2}{L_2}, \\
\gamma &= \left(\frac{R_1}{\sigma} + \alpha L_m \beta \right)
\end{aligned} \tag{4.2}$$

де J – момент інерції ротора, R_1 , R_2 , L_1 , L_2 – опори та індуктивності статора і ротора, L_m – індуктивність намагнічуючого контуру системи, p_n – кількість пар полюсів [20].

Алгоритми векторного керування АД спроектовано й записано в синхронній системі координат $(d-q)$ і приведено на рис. 4.2 [11]. Ця система обертається відносно стаціонарної системи координат зі швидкістю ω_0 , [20].

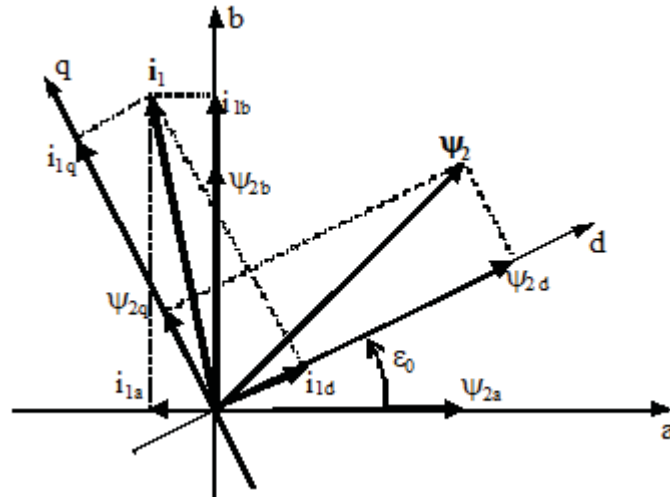


Рисунок 4.2 - Розташування векторів АД [21]

Перетворення координат визначаються [20]:

$$\begin{aligned} X_{dq} &= e^{J\varepsilon_0} X_{ab} \\ X_{ab} &= e^{J\varepsilon_0} X_{dq} \end{aligned} \quad (4.3)$$

$$\text{де } e^{-J\varepsilon_0} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_0 & \sin \varepsilon_0 \\ -\sin \varepsilon_0 & \cos \varepsilon_0 \end{bmatrix}.$$

В системі координат x_{yz} позначає двовимірний вектор напруги, струму статора і потоку, ε_0 – кутове положення системи координат $(d-q)$ відносно стаціонарної [20].

Повний алгоритм прямого векторного керування асинхронним двигуном з використанням замкненого спостерігача магнітного потоку пониженого порядку містить спостерігач магнітного потоку АД, регулятори швидкості та потоку, регулятор струму по осі d та модифікований регулятор струму по осі q[21]:

Спостерігач магнітного потоку АД будується таким чином[21]:

$$\begin{aligned} |\dot{\hat{\psi}}| &= -\alpha |\hat{\psi}| + \alpha L_m i_{1d}, \\ \dot{\varepsilon}_0 &= \omega_0 = \omega + \alpha L_m \frac{i_{1q}}{|\hat{\psi}|}, \end{aligned} \quad (4.4)$$

Регулятор потоку створюється за наступними формулами[21]:

$$\begin{aligned} i_{1d}^* &= \frac{1}{\alpha L_m} (\alpha \psi^* + \dot{\psi}^* - k_{\psi} \tilde{\psi} - x_{\psi}) \\ \dot{x}_{\psi} &= k_{\psi i} \tilde{\psi}, \end{aligned} \quad (4.5)$$

Регулятор струму по осі(d) має наступний вигляд[21]:

$$\begin{aligned} u_{1d} &= \sigma (\gamma i_{1d}^* - \omega_0 i_{1q} - \alpha \beta |\hat{\psi}| + \dot{i}_{1d}^* - k_{id} \tilde{i}_d - x_d), \\ \dot{x}_d &= k_{id} \tilde{i}_d, \text{ де} \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$i_{1d}^* = \frac{1}{\alpha L_m} \{ \alpha \dot{\psi}^* + \ddot{\psi}^* - k_{\psi} [-(\alpha + k_{\psi}) \tilde{\psi} + \alpha L_m \tilde{i}_d - x_{\psi}] - \dot{x}_{\psi} \} \quad (4.7)$$

Регулятор швидкості складається з таких формул[21]:

$$\begin{aligned} i_{1q}^* &= \frac{1}{\mu \psi^*} (-k_{\omega} \tilde{\omega} + \hat{M}_c + \dot{\omega}^*) \\ \dot{\hat{M}}_c &= -k_{\omega i} \tilde{\omega} \end{aligned} \quad (4.8)$$

В свою чергу модифікований регулятор струму по осі (q) виглядатиме так [19]:

$$\begin{aligned} u_{1q} &= \sigma \left[\gamma i_{1q}^* + \omega_0 i_{1d} + \beta \omega \psi^* + \dot{i}_{1q}^* - k_{iq} \tilde{i}_q - \frac{1}{\psi^*} (\dot{\psi}^* \tilde{i}_q + \zeta) \right] \\ \dot{\zeta} &= k_{\eta i} (\psi^* \tilde{i}_q) \end{aligned} \quad (4.9)$$

$$\dot{i}_{1q}^* = \frac{1}{\mu \psi^*} \left[-k_{\omega} (-k_{\omega} \omega + \mu \psi^* \tilde{i}_q) + \dot{\hat{M}}_c + \ddot{\omega}^* \right] - \frac{\dot{\psi}^*}{\psi^*} i_{1q}^* \quad (4.10)$$

Реальні напруги, що прикладаються до обмоток статора двигуна, розраховуються так[19]:

$$\begin{pmatrix} u_{1a} \\ u_{1b} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varepsilon_0 & -\sin \varepsilon_0 \\ \sin \varepsilon_0 & \cos \varepsilon_0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u_{1d} \\ u_{1q} \end{pmatrix} \quad (4.11)$$

Структурна схема алгоритму прямого векторного керування зображена на
рис. 4.3 [21]

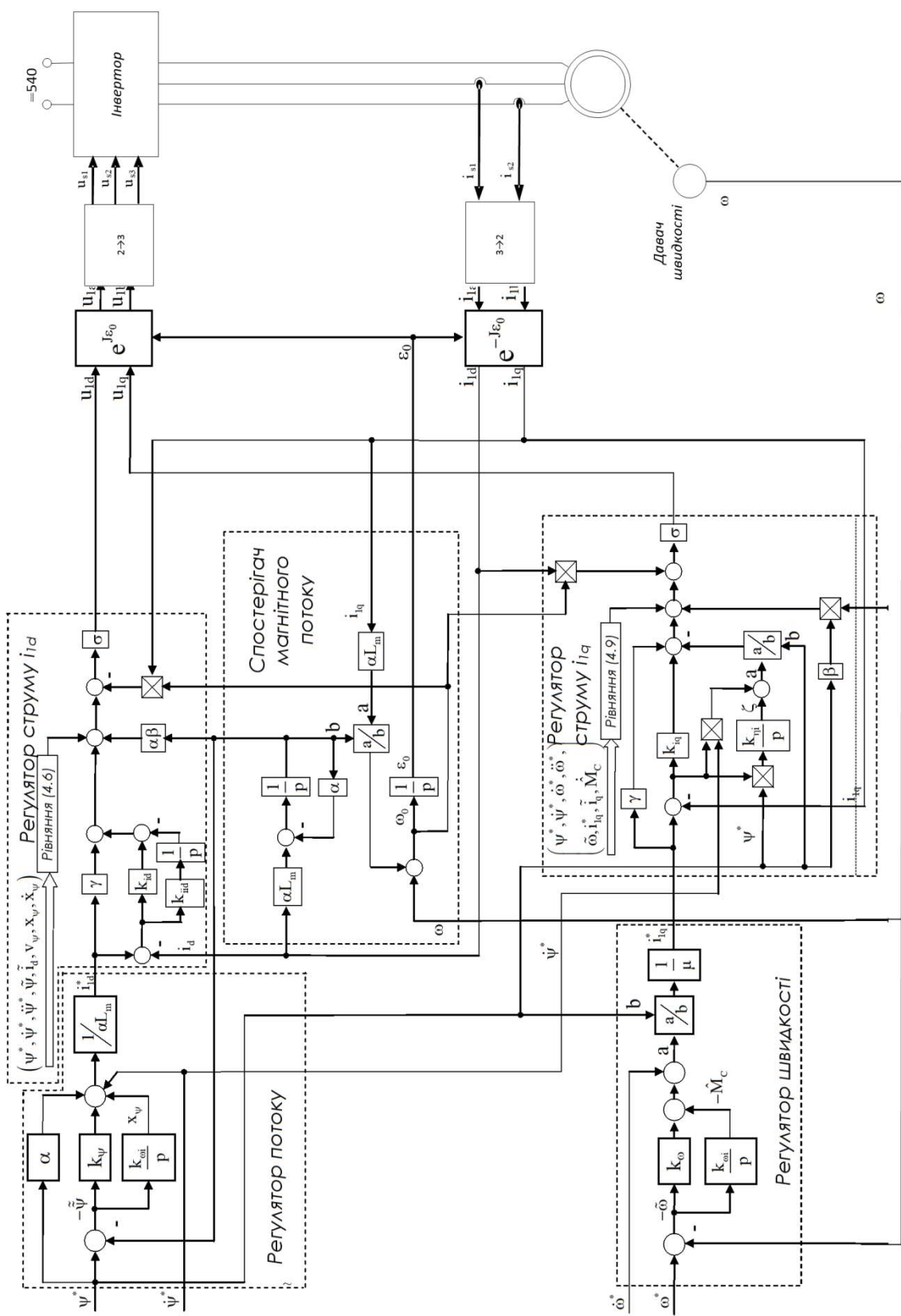


Рисунок 4.3 - Структурна схема алгоритму прямого векторного керування (без структурної схеми АД) [19]

4.2 Розрахунок регулятора швидкості

Почнемо з опису регульованого електричного у вигляді наступної аперіодичної ланки[21]:

$$W(p) = \frac{M_d}{\omega_0 - \omega} = \frac{\beta}{T_\omega \cdot p + 1}, \quad (4.12)$$

де β - модуль жорсткості;

T_ω - електромагнітна стала часу двигуна[19].

Наступним кроком буде доповнення передатної функції двигуна ланкою одномасової схеми, яка описує механічну частину, а також функцію керуючого впливу частотного перетворювача, яка може бути представлена у вигляді [21]:

$$W_{пч}(p) = \frac{K_{пч}}{T_\mu \cdot p + 1} \quad (4.13)$$

Побудуємо структурну схему об'єкта регулювання по контуру швидкості, що віображена на рисунку 4.4.

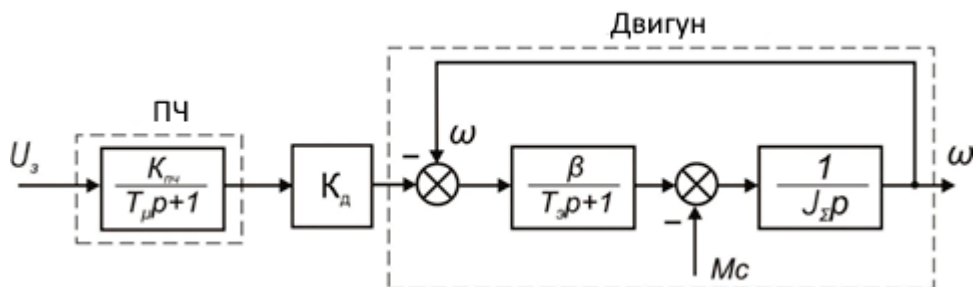


Рисунок 4.4 - Структурна схема об'єкта регулювання[19]

В даній структурі апараметри передаточних функцій розраховуються послідовно:

Передатна функція перетворювача частоти[21]:

$$W_{пч}(p) = \frac{K_{пч}}{T_\mu \cdot p + 1} = \frac{5}{0,01 \cdot p + 1}, \quad (4.14)$$

де $K_{пч} = \frac{f_H}{U_3} = \frac{50}{10} = 5$ - коефіцієнт підсилення ПЧ,

$T_\mu = 0,01$ - постійна часу перетворювача частоти[19].

Інші параметри схеми[23]:

β - модуль статичної жорсткості;

T_e - електромагнітна стала часу двигуна;

J_M - момент інерції механізму;

J_Σ - сумарний момент інерції;

T_M - електромеханічна постійна двигуна;

K_D - коефіцієнт передачі двигуна.

$$T_e = \frac{1}{\omega_0 \cdot S_{KH}} = \frac{1}{314 \cdot 0.0099} = 0.322; \quad (4.15)$$

$$\beta = \frac{M_H}{\omega_c - \omega_H} = \frac{1286}{157.08 - 155.525} = 826.94 \text{ Нм} \cdot \text{с}; \quad (4.16)$$

$$T_M = \frac{J_\Sigma}{\beta} = \frac{3.622}{826.94} = 4.38 \cdot 10^{-3} \text{ с}; \quad (4.17)$$

Приведений сумарний момент інерції електромеханічної системи [21]:

$$J_\Sigma = J_\partial + \frac{J_M}{i_p^2} = 3.6 + \frac{56}{36^2} = 3.622 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; \quad (4.18)$$

$$K_D = \frac{2 \cdot \pi}{p} = \frac{2 \cdot 3.14}{2} = 3.14 \quad (4.19)$$

Наступним кроком буде використання контуру регулювання зі зворотним зв'язкою по швидкості для того, щоб отримати задання динамічних властивостей системи електроприводу. Коефіцієнт контуру рахується за наступною формулою [21]:

$$K_\omega = \frac{U_3}{1,3 \cdot \omega_H} = \frac{10}{1,3 \cdot 155.525} = 0,049 \text{ В} \cdot \text{с} \quad (4.20)$$

Враховуючи всі перетворення, загальна структурна схема АД-ПЧ матиме наступний вигляд:

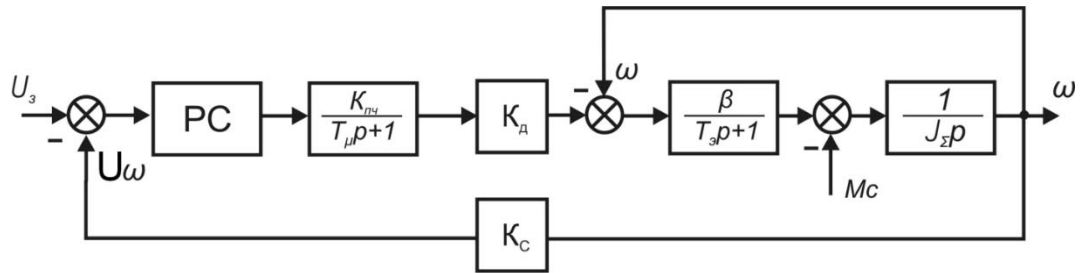


Рисунок 4.5 - Структурна схема частотного регулювання [21]

Після цього запишемо передатну функцію двигуна[21]:

$$\begin{aligned}
 W_d(p) &= \frac{\frac{\beta \cdot K_d}{J_\Sigma \cdot p \cdot (T_e \cdot p + 1)}}{1 + \frac{\beta}{J_\Sigma \cdot p \cdot (T_e \cdot p + 1)}} = \frac{\beta \cdot K_d}{J_\Sigma \cdot T_e \cdot p^2 + J_\Sigma \cdot p + \beta} = \\
 &= \frac{K_d}{T_M \cdot T_\Sigma \cdot p^2 + T_M \cdot p + 1} = \frac{3.14}{4.38 \cdot 10^{-3} \cdot 0.322 \cdot p^2 + 4.38 \cdot 10^{-3} \cdot p + 1}
 \end{aligned} \quad (4.21)$$

Приведемо структурну схему регулювання зі зворотнім зв'язком по швидкості виглядає як:

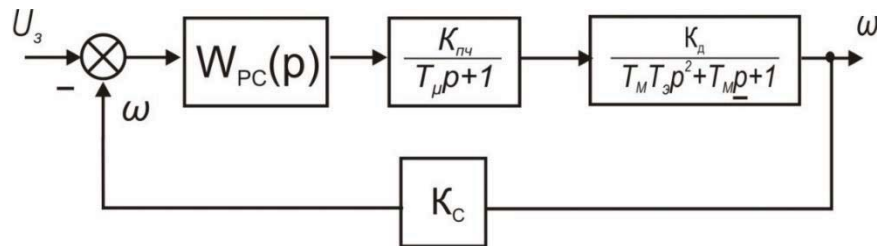


Рисунок 4.6 - Структурна схема регулювання по контуру швидкості[21]

Виведемо передаточну функцію об'єкта керування за швидкістю[21]:

$$\begin{aligned}
 W_{окш}(p) &= \frac{K_{пч} \cdot K_d}{(T_\mu \cdot p + 1) \cdot (T_M \cdot T_e \cdot p^2 + T_M \cdot p + 1)} = \\
 &= \frac{5 \cdot 3.14}{(0.01 \cdot p + 1) \cdot (4.38 \cdot 10^{-3} \cdot 0.322 \cdot p^2 + 4.38 \cdot 10^{-3} \cdot p + 1)}
 \end{aligned} \quad (4.22)$$

Прийmemo, що передатна функція об'єкта регулювання має такий вигляд:

$$W_{окш}(p) = \frac{K_1 \cdot K_2 \dots K_n}{\prod_1^m (T_i \cdot p + 1)}, \quad (4.23)$$

де T_i - постійна часу об'єкта регулювання [21].

Для компенсації постійних часу можна виключити постійні часу з розімкнутого контуру регулювання. Також є така сама можливість виключити всі коефіцієнти $K_1 \cdot K_2 \dots K_n$ з розімкнутого контуру регулювання, а заради усунення статичної помилки – можна ввести інтегральний елемент з постійною часу в контур регулювання[21].

Отже, замінемо вихідний розімкнутий контур регулювання бажаним контуром, який має загальний коефіцієнт підсилення. Коефіцієнт рівний одиниці, це значить, що зворотний зв'язок представляється одиничним. Але сам контур володіє астатизмом першого порядку, а також забезпечує високу швидкодію внаслідок присутності незначних сталих часу, які залишаються не скомпенсованими[21]:

$$W_{БАЗ}(p) = W_{ОКШ}(p) \cdot W_{РШ}(p) = \frac{1}{T_0 p \cdot \prod_{i=1}^m (T_i p + 1)} \quad (4.24)$$

де i - число сталих, які скомпенсовано регулятором [21].

Після цього визначаємо передатну функцію регулятора:

$$W_{РШ}(p) = \frac{W_{БАЗ}(p)}{W_{ОКШ}(p)} = \frac{T_M \cdot T_e \cdot p^2 + T_M \cdot p + 1}{T_U \cdot p} = \frac{1.41 \cdot 10^{-3} \cdot p^2 + 4.38 \cdot 10^{-3} \cdot p + 1}{0.0068 \cdot p} \quad (4.25)$$

де $T_U = a_C \cdot K_\omega \cdot K_{ПЧ} \cdot K_D \cdot T_M = 2 \cdot 0.049 \cdot 5 \cdot 3.14 \cdot 4.38 \cdot 10^{-3} = 0.0068$ с [21],

a_C - коефіцієнт демпфування (оптимальне за швидкодією перехідного процесу значення) [21].

Після перетворень отримуємо вираз для регулятора швидкості:

$$W_{РШ}(p) = 0.207 \cdot p + 0.644 + \frac{1}{0.0068 p}. \quad (4.26)$$

Внаслідок усіх проведених операцій та розрахунків отримано ПД регулятор [21].

Висновки до четвертого розділу:

Було описано векторне керування асинхронним електроприводом призначеним для механізму підвісної канатної дороги. Також, представлено математичну модель асинхронного електродвигуна в стаціонарній системі координат (a-b) і алгоритм прямого векторного керування і структурну схему для нього. Отримані результати, включаючи математичний опис елементів електромеханічної системи отриманих раніше дозволяють розробити модель електромеханічної системи для подальшого проведення досліджень динамічних режимів роботи електромеханічної системи.

РОЗДІЛ 5. ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ПІДВІСНОЇ КАНАТНОЇ ДОРОГИ

5.1 Розробка моделі для дослідження динамічних режимів

На основі математичного опису елементів електромеханічної системи получена модель для дослідження її динамічних режимів роботи на базі пакету прикладних програм MATLAB Simulink. Схема моделі і її елементів приведена на рис. 5.1 – 5.3. За основу розробленої моделі було взято модель прямого векторного керування асинхронним двигуном, яку було розглянуто під час проходження курсу автоматизації електромеханічних систем [23].

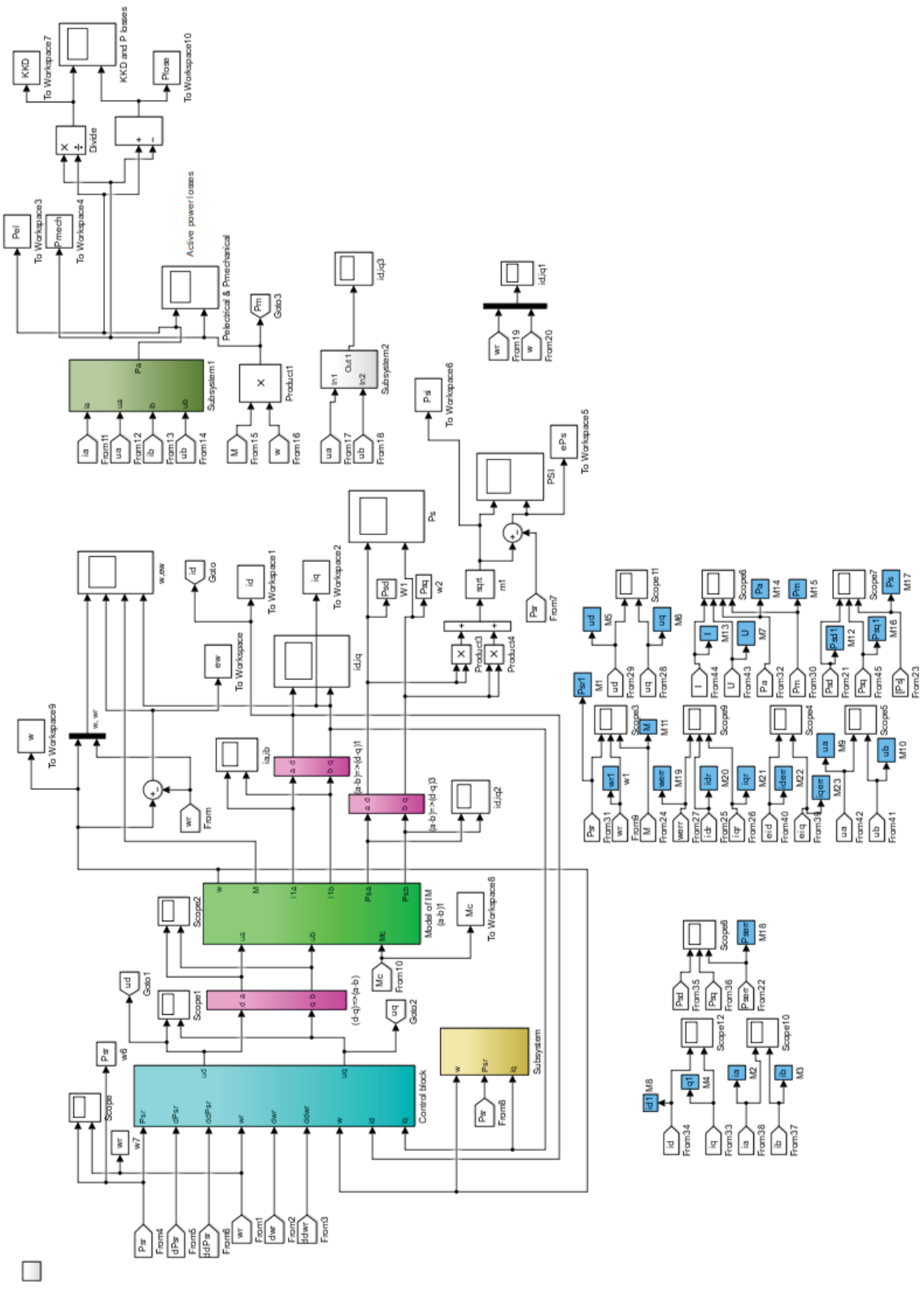


Рисунок 5.1- Загальна структура схеми моделі

Приведена вище структура включає в себе модель асинхронного електродвигуна в стаціонарних координатах (а-в) рис. 5.2, регулятор швидкості, що розташовано в блоці Control block і зображений на рис. 5.3, а також блок перетворення координат (d-q) в (а-в), блок для регулювання потокозчеплення і блок розрахунку похибок з врахуванням зворотних зв'язків.

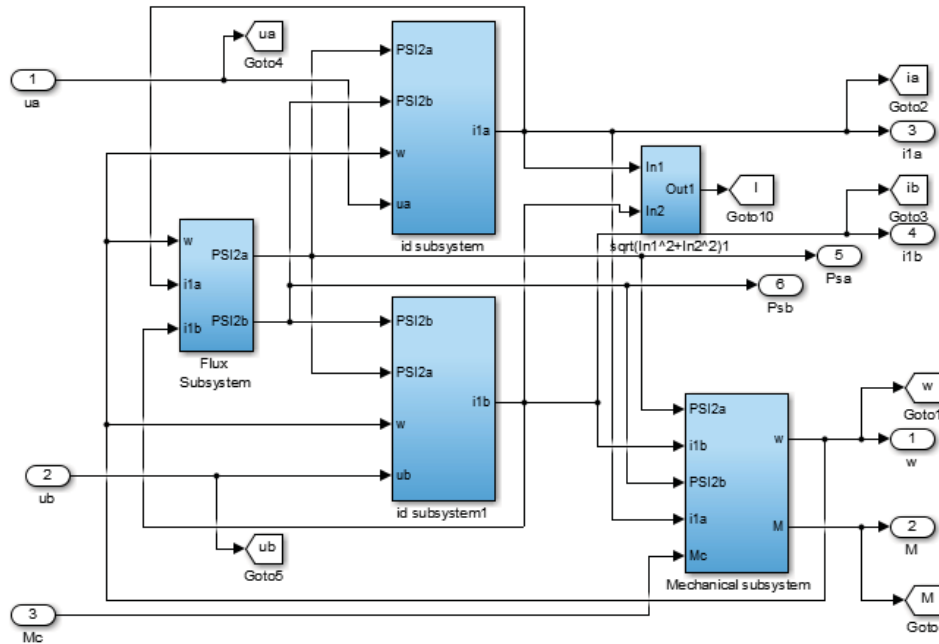


Рисунок 5.2 - Модель асинхронного двигуна

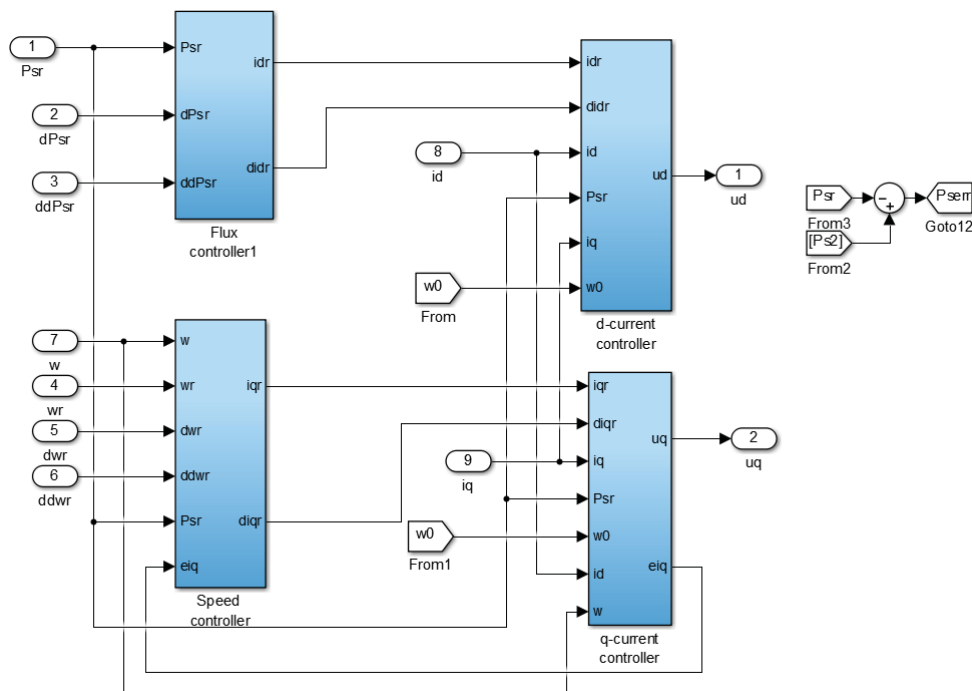


Рисунок 5.3 – Регулятор швидкості

Для моделювання даної системи розрахуємо коефіцієнти регуляторів:

Незкомпенсована стала часу [21]:

$$\tau_{\mu} = T_u + 0,5T_p + 0,5T_{\phi} = 2,5 \cdot 10^{-4} + 0,5 \cdot 6,66 \cdot 10^{-9} = 0,00025(\text{с}) \quad (5.1)$$

де T_u – значення сталої часу ШІМ[21];

$$T_u = \frac{1}{f_{uim}} = \frac{1}{4000} = 2,5 \cdot 10^{-4}(\text{с}) \quad (5.2)$$

де T_p – розрахункова стала часу[21];

$$T_p = \frac{1}{f_{\kappa}} = \frac{1}{150000000} = 6,666 \cdot 10^{-9}(\text{с}), \quad (5.3)$$

$$\tau_{\mu}^{-1} = \frac{1}{2,5 \cdot 10^{-4}} = 4000(\text{с}) \quad (5.4)$$

Якщо апроксимувати не модельовану динаміку в контурі регулювання струму, то $\omega_{\mu} = \tau_{\mu}^{-1} = 4000$ [21].

$$\omega_{\mu} > (5-6)\omega_{oi} \quad (5.5)$$

де $\omega_{oi} \approx 800$ – полоса пропускання в контурі регулювання струму[21];

$$k_i = 2\xi\omega_{oi} = 2 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot 800 = 1131,37 \approx 1150, \quad (5.6)$$

$$k_{ii} = \frac{k_i^2}{2} = \frac{1150^2}{2} = 661250 \quad (5.7)$$

Так як контур потокозчеплення повинен мати максимальну швидкодію, то $\omega_{oi} \approx \omega_{\psi}$. Тоді: $k_{\psi} = k_i = 1150, k_{\psi i} = 661250$ [21].

Полоса пропускання в контурі регулювання струму в 5-6 разів більша за полюсу пропускання в контурі регулювання швидкості.[21]

$$\omega_{oi} > (5-6)\omega_{ow} \quad (5.8)$$

де $\omega_{ow} \approx 160$ – полоса пропускання в контурі регулювання швидкості;

$$k_{\omega} = 2\xi\omega_{0\omega} = 2 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot 160 = 227 \approx 230, \quad (5.9)$$

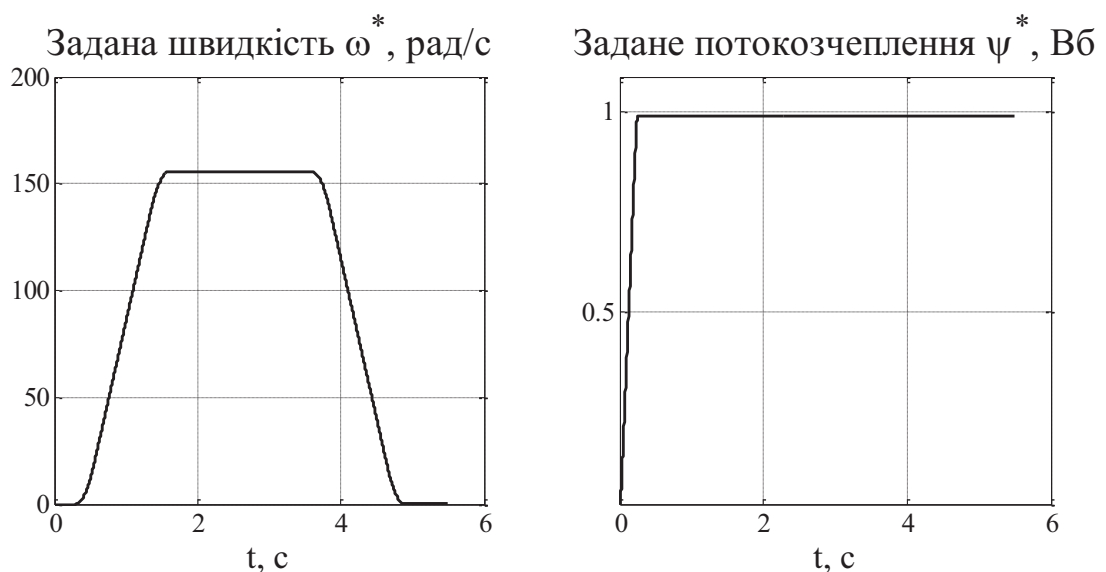
$$k_{\omega i} = \frac{k_{\omega}^2}{2} = \frac{230^2}{2} = 26450 \quad (5.10)$$

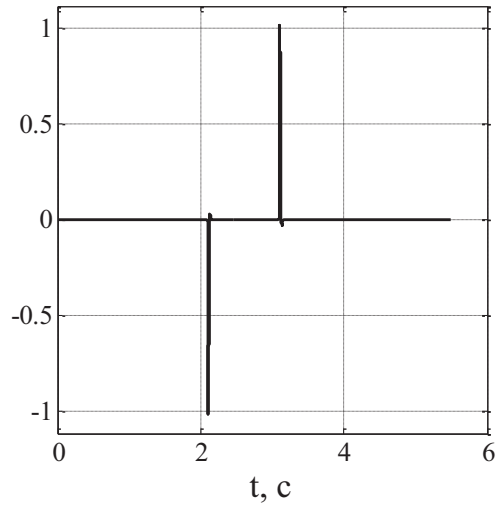
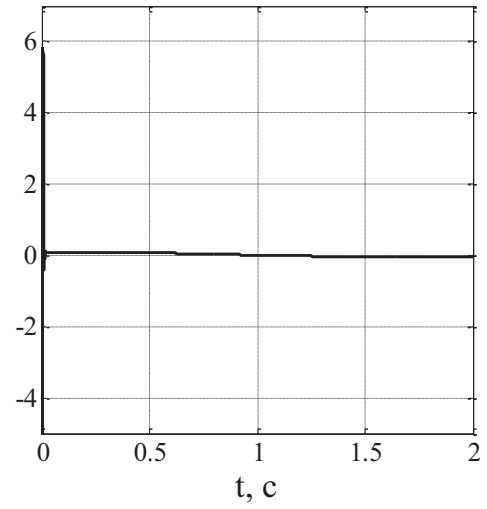
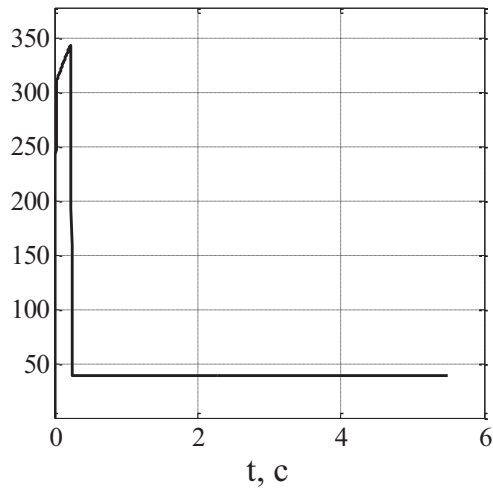
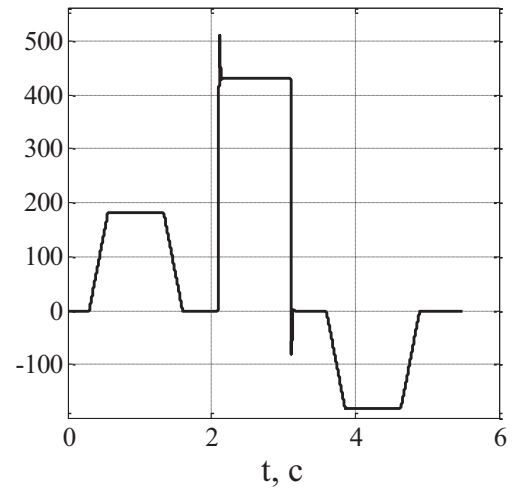
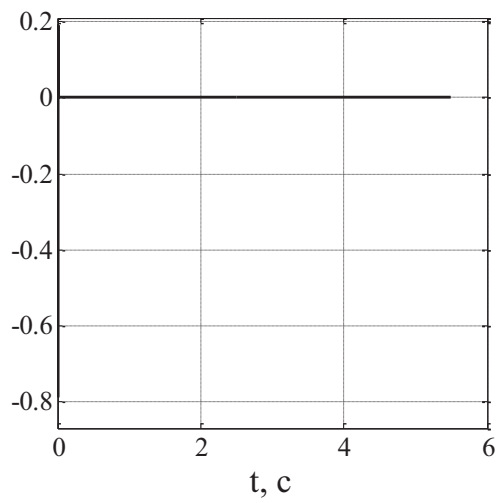
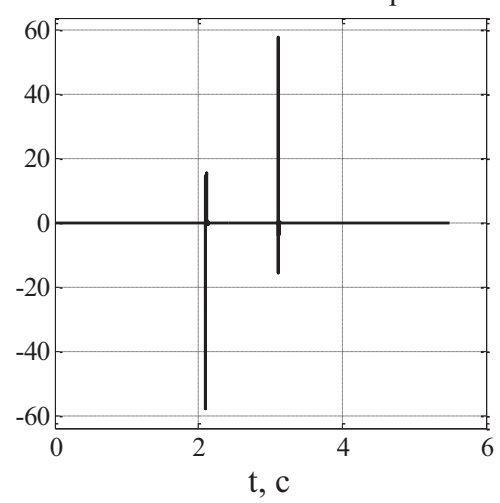
5.2 Проведення досліджень роботи електромеханічної системи

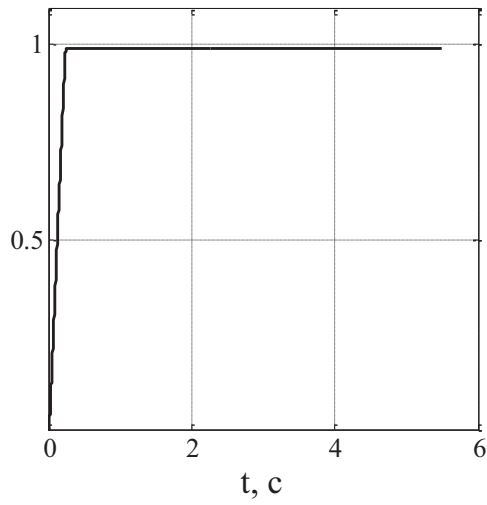
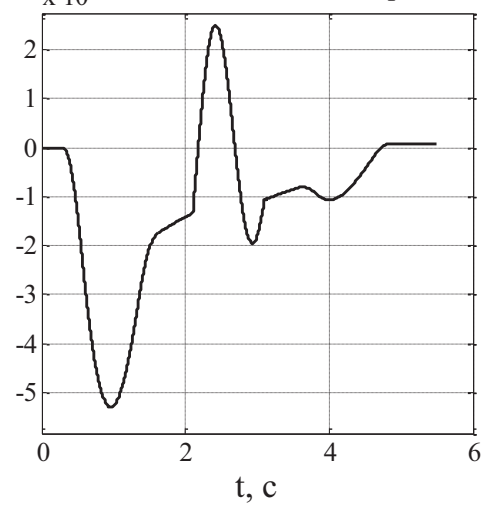
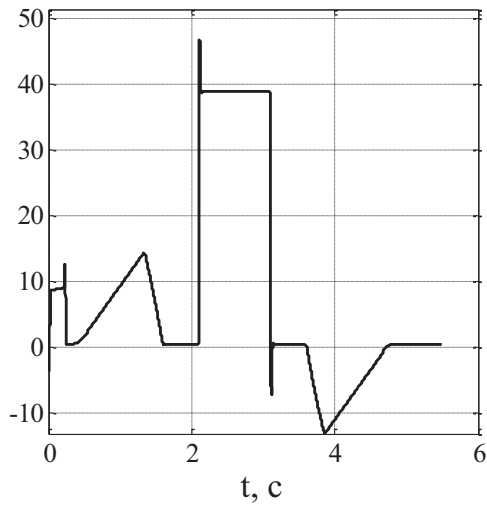
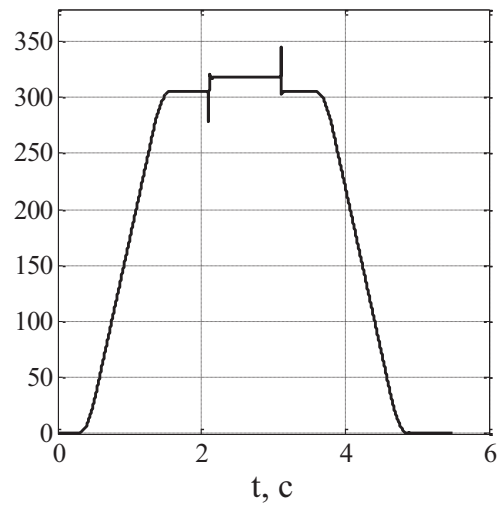
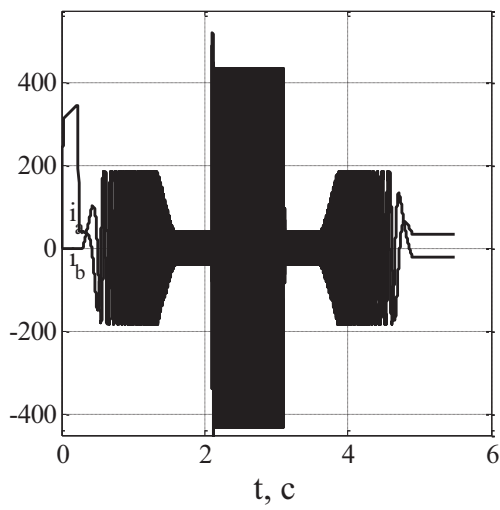
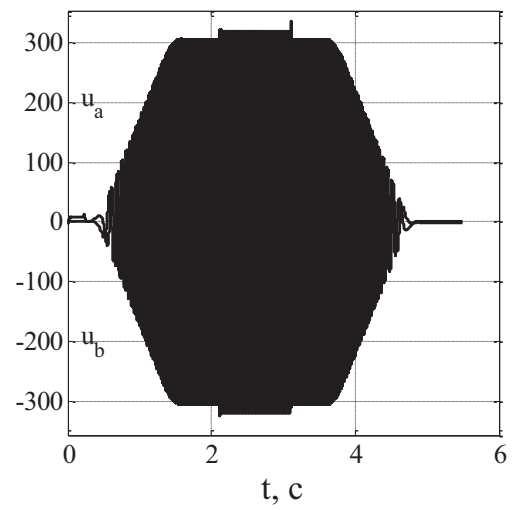
В цьому розділі проведено дослідження зміни енергетичних характеристик, а саме втрат потужності при зміні навантаження на тяговий канат та зміні швидкості руху тягового канату.

Програма досліджень включає в себе пуск до сталої швидкості без навантаження, в момент часу 2.1 с до 3.1 с накладається навантаження у вигляді статичного моменту, після цього відбувається сповільнення. Дослідження проведено для наступних величин навантаження: $M_c = 1.1M_{ch}$; $M_c = M_{ch}$, $M_c = 0.9M_{ch}$, $M_c = 0.8M_{ch}$, $M_c = 0.7M_{ch}$, $M_c = 0.6M_{ch}$, $M_c = 0.5M_{ch}$, $M_c = 0.4M_{ch}$, $M_c = 0.3M_{ch}$, $M_c = 0.2M_{ch}$ і для величин швидкості руху тягового канату $\omega = \omega_n$, $\omega = 0.7\omega_n$, $\omega = 0.45\omega_n$.

Результати дослідження зображено на рис. 5.1 у вигляді зображення перехідних процесів в електромеханічній системі.



Похибка $\tilde{\omega}$, рад/с $\times 10^{-7}$ Похибка $\tilde{\psi}$, ВбЗаданий струм i_d^* , АЗаданий струм i_q^* , АПохибка струму \tilde{i}_d , АПохибка струму \tilde{i}_q , А

Потокозчеплення ψ_d , ВбПотокозчеплення ψ_q , ВбНапруга ротора u_d , ВНапруга ротора u_q , ВСтруми статора i_a та i_b , АНапруги статора u_a та u_b , В

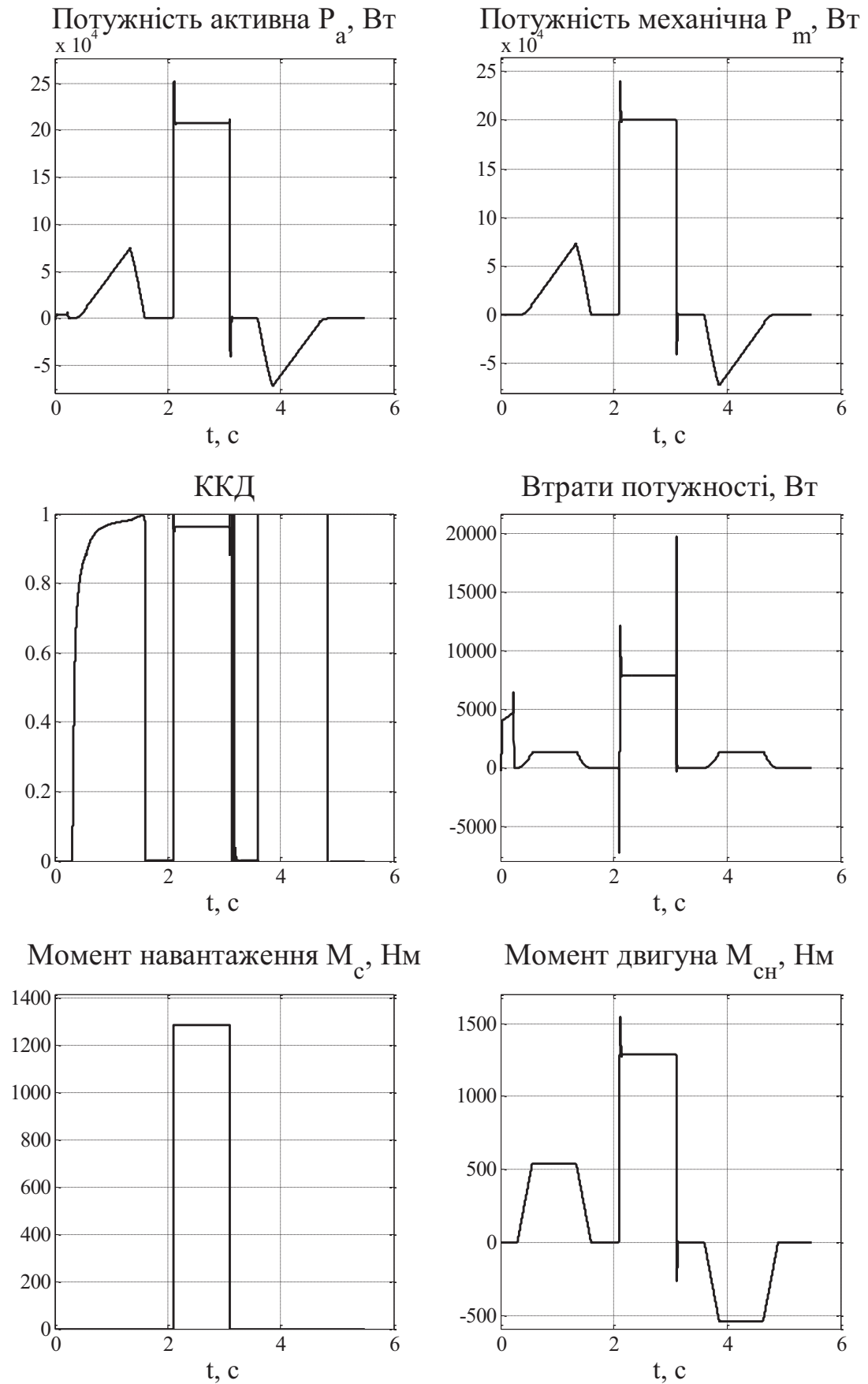
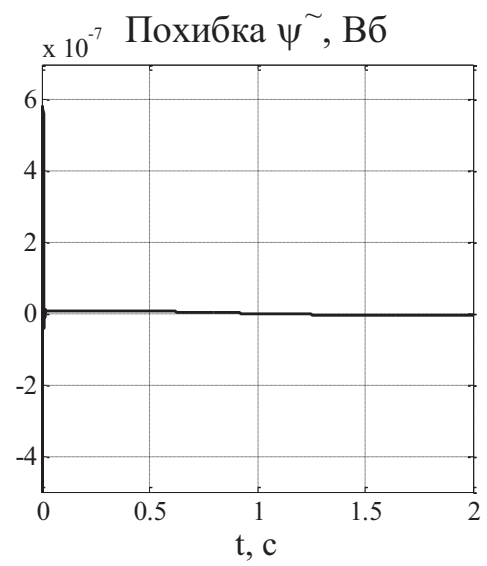
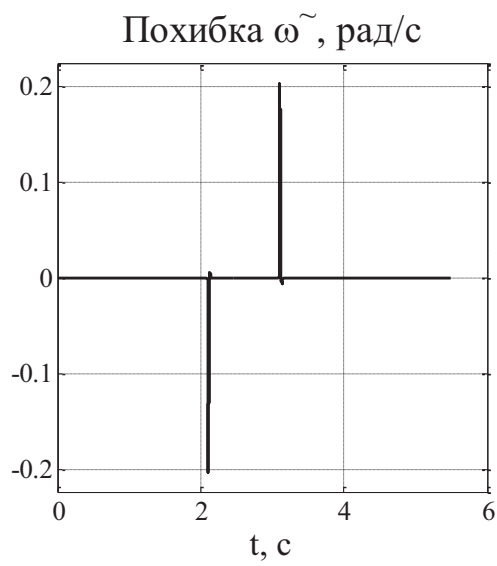
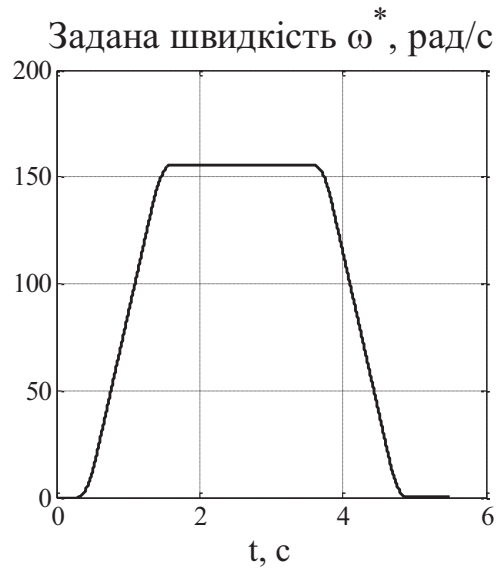
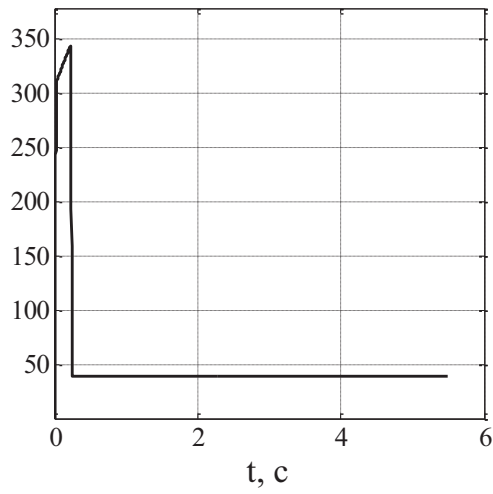
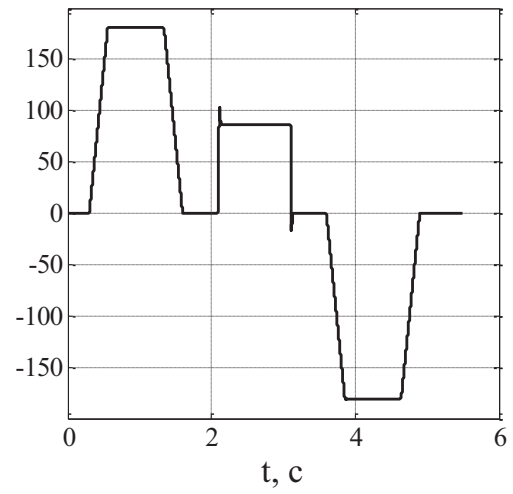
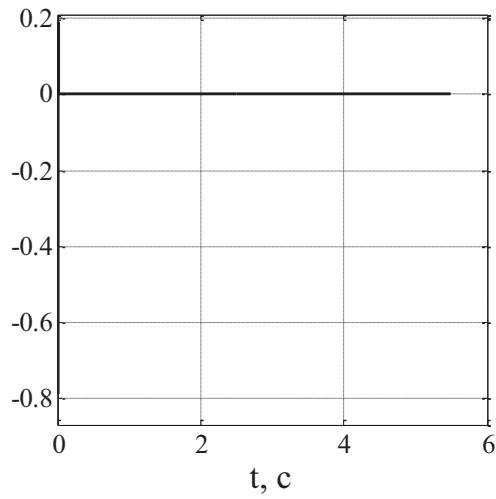
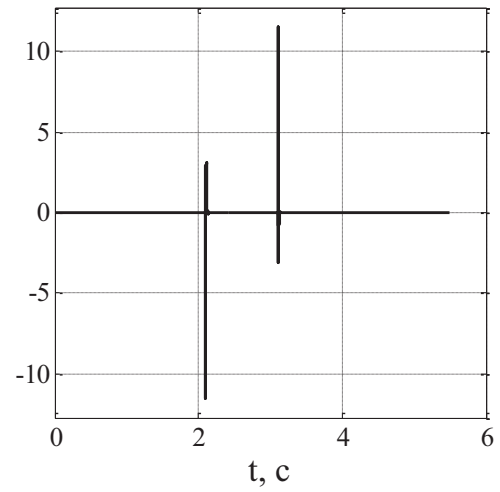
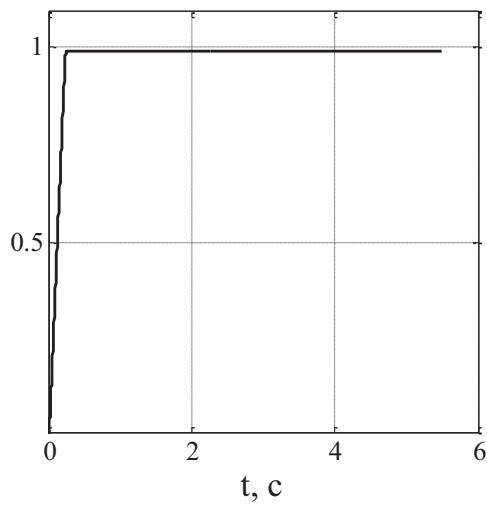
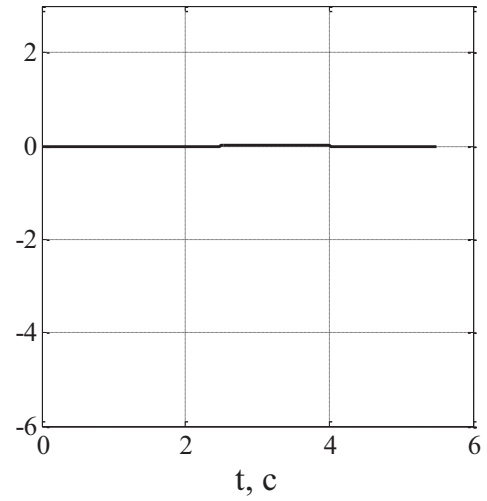


Рисунок 5.4 – Перехідні процеси при значенні $M_c = M_{ch} = 1268 \text{ Нм}$ та

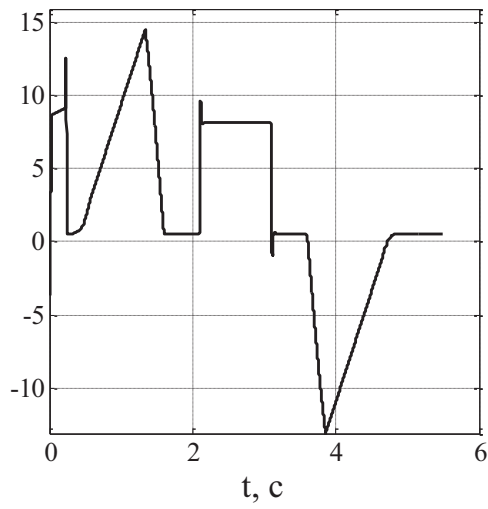
$$\omega = \omega_n = 155.525 \text{ рад/с}$$

Проведемо дослідження роботи електромеханічної системи при значенні $M_c = 0.2M_{сн} = 257.2 \text{ Нм}$. Результати відображено на рис. .

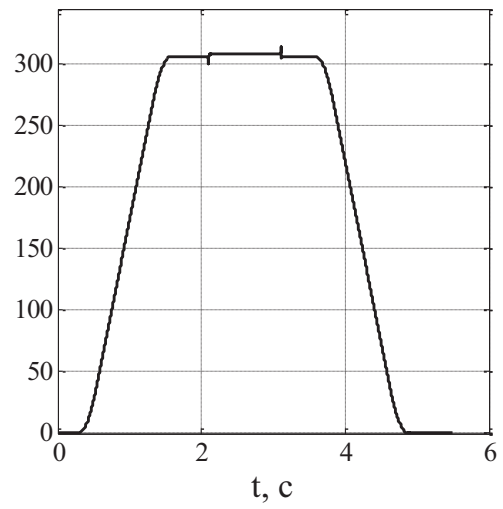


Заданий струм i_d^* , АЗаданий струм i_q^* , АПохибка струму \tilde{i}_d , АПохибка струму \tilde{i}_q , АПотокозчеплення ψ_d , ВбПотокозчеплення ψ_q , Вб

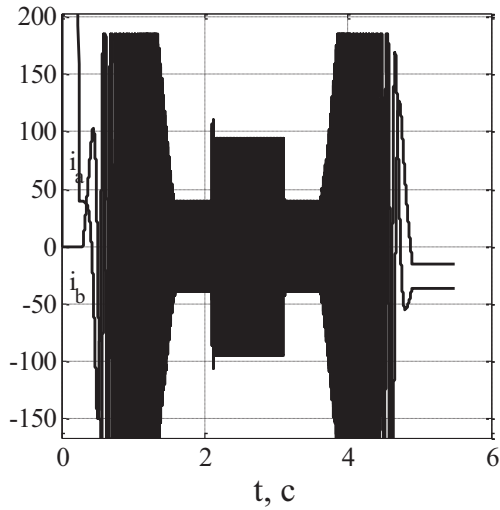
Напруга ротора u_d , В



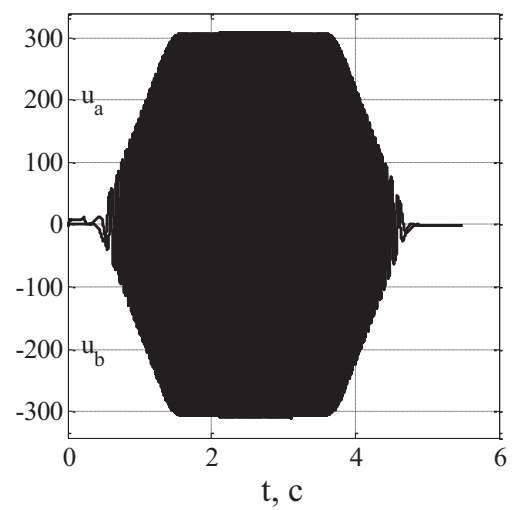
Напруга ротора u_q , В



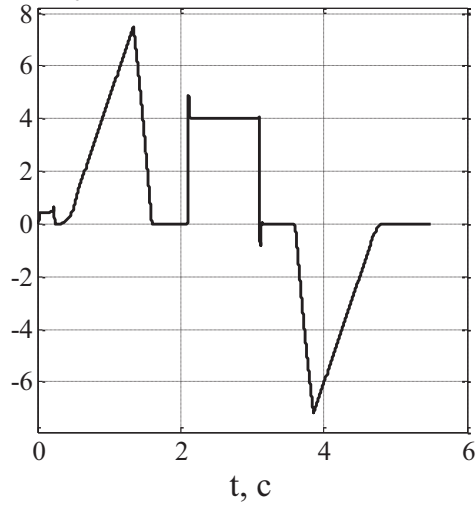
Струми статора i_a та i_b , А



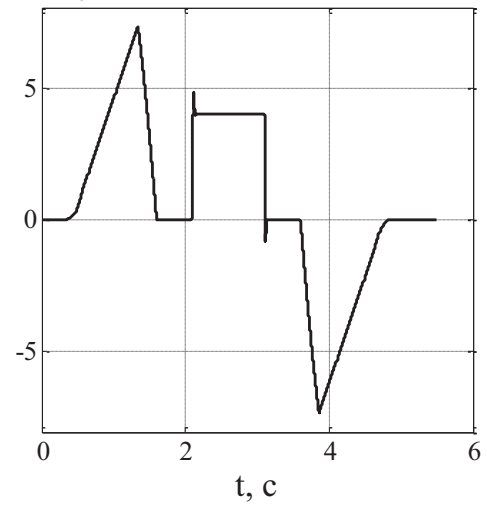
Напруги статора u_a та u_b , В



Потужність активна P_a , Вт $\times 10^4$



Потужність механічна P_m , Вт $\times 10^4$



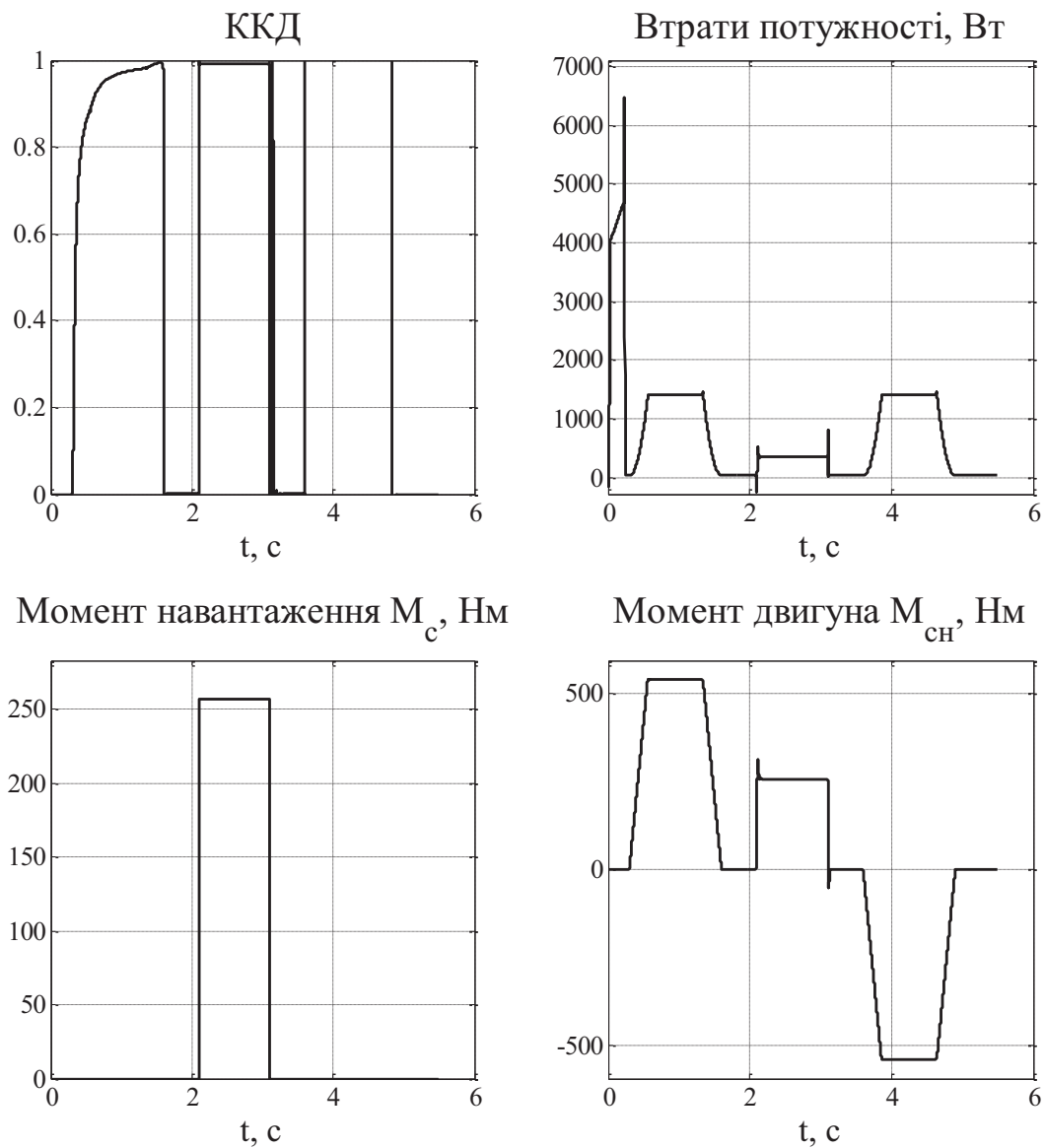


Рисунок 5.5 – Перехідні процеси при значенні $M_c = 0.2M_{сн} = 257.2$ Нм та $\omega = \omega_n$

Наступним кроком дослідимо зміну перехідних процесів при зміні моменту навантаження від $0.3M_{сн}$ до $1.1M_{сн}$ при сталій швидкості $\omega = \omega_n$. Результати дослідження приведені далі, дивитись Додаток 1.

На базі проведених досліджень проаналізуємо зміну значень потужностей, коефіцієнту корисної дії та похибок.

Графіки залежностей параметрів роботи електромеханічної системи підвісної канатної дороги від зміни моменту навантаження зображено на рис 5.6 – 5.10.

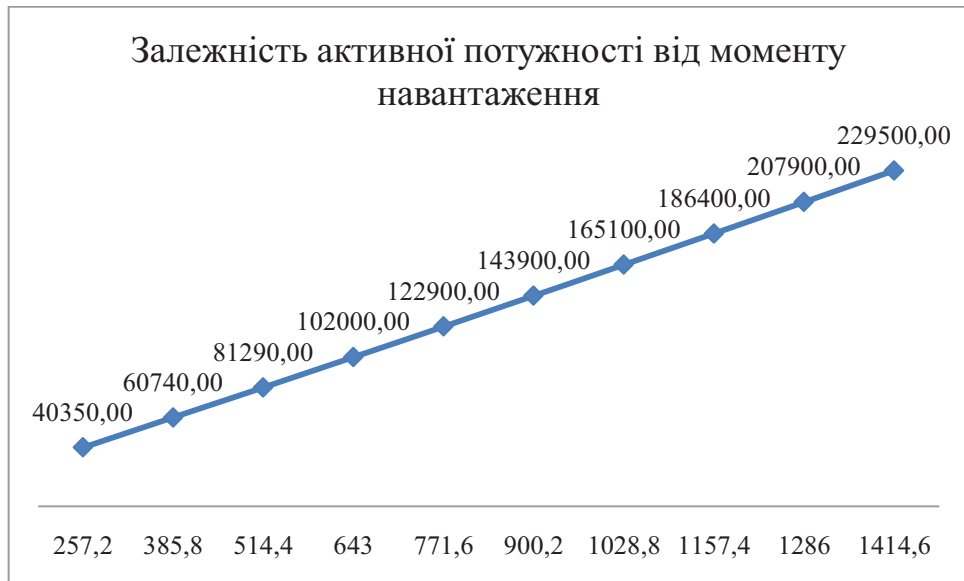


Рисунок 5.6 – Залежність активної потужності від моменту навантаження

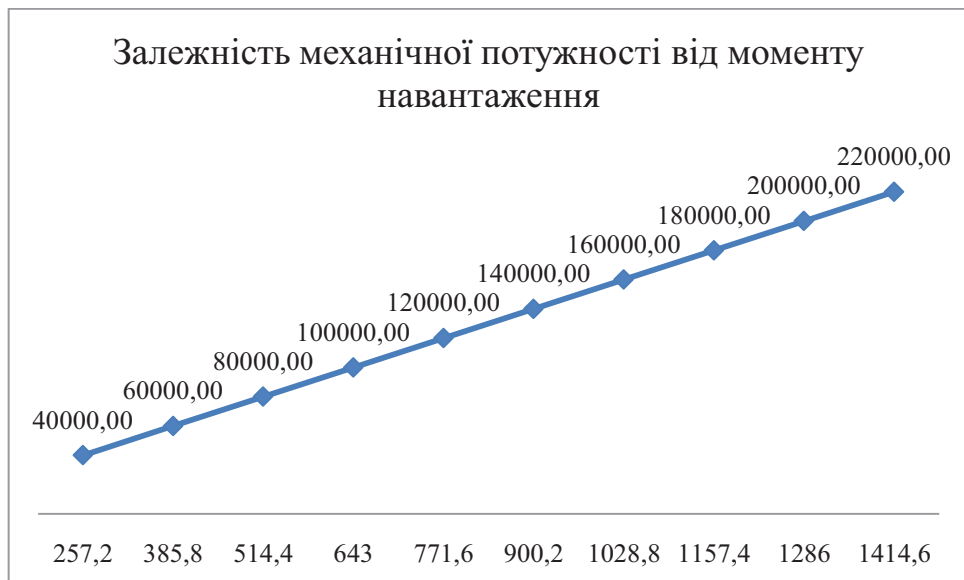


Рисунок 5.7 – Залежність механічної потужності від моменту навантаження



Рисунок 5.8 – Залежність зміни у втратах потужності від моменту навантаження

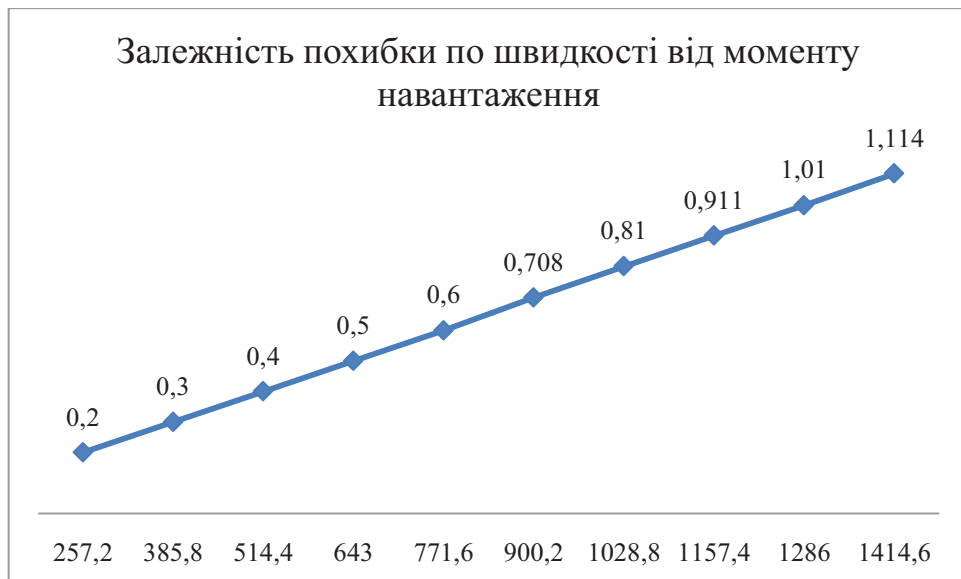


Рисунок 5.9 – Залежність зміни похибки відпрацювання швидкості від моменту навантаження

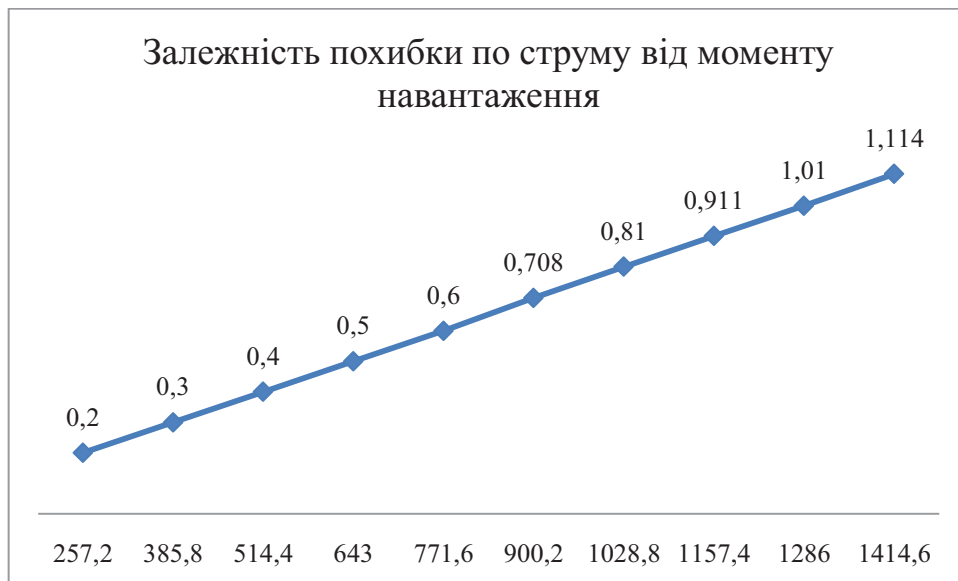


Рисунок 5.10 – Залежність зміни похибки відпрацювання струму від моменту навантаження

З проведених досліджень видно, що втрати потужності та похибки прямо пропорційно залежать від значення моменту навантаження. Похибки не перевищують допустимих значень і не впливають на роботу системи.

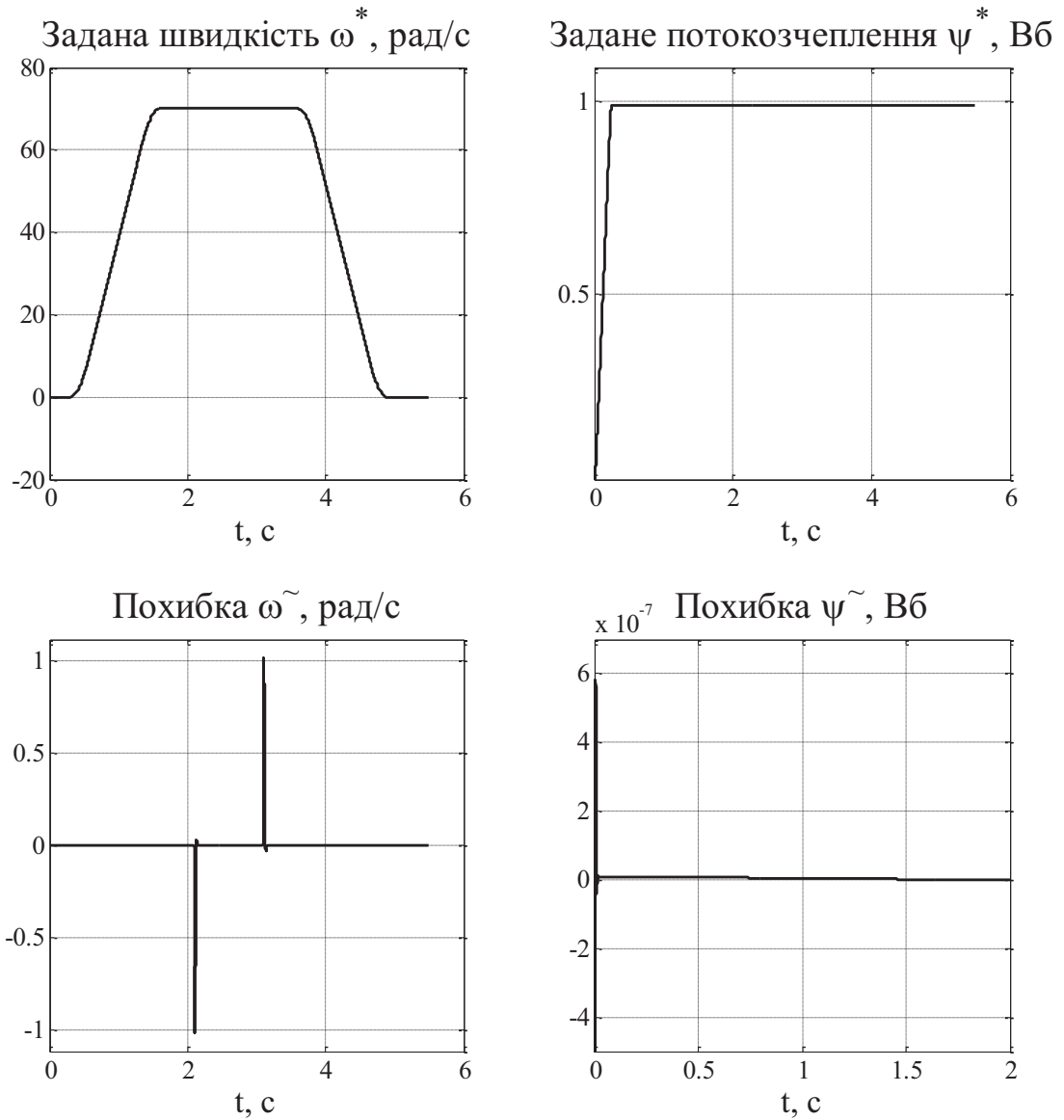
5.3 Дослідження роботи електромеханічної системи ПКД при зміні швидкості руху підвісної канатної дороги

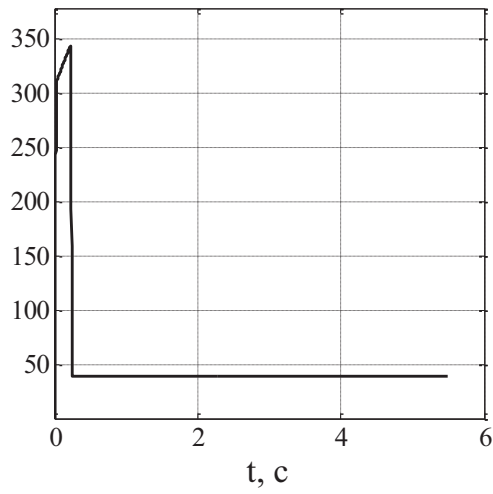
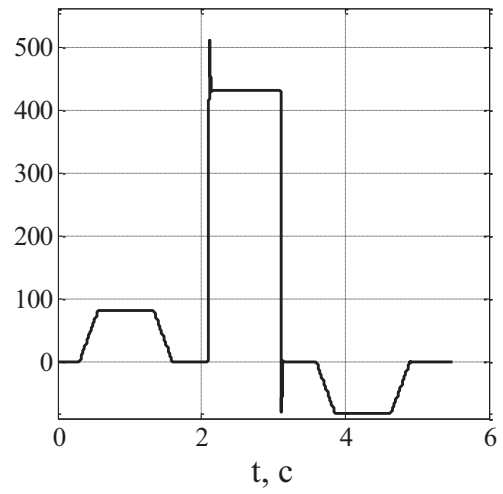
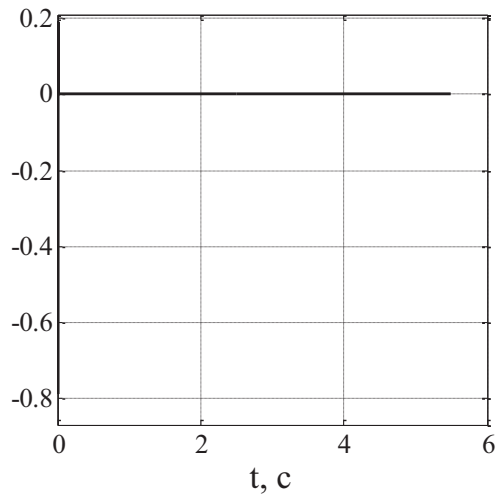
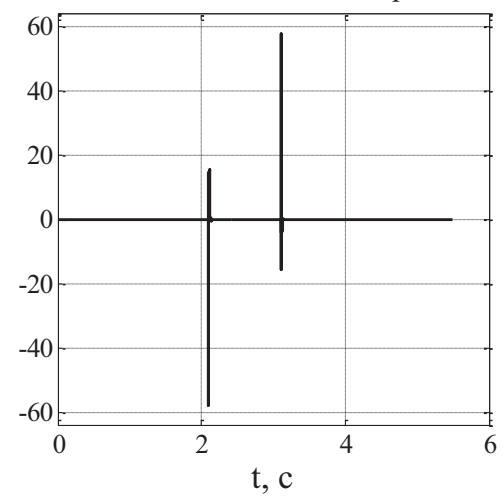
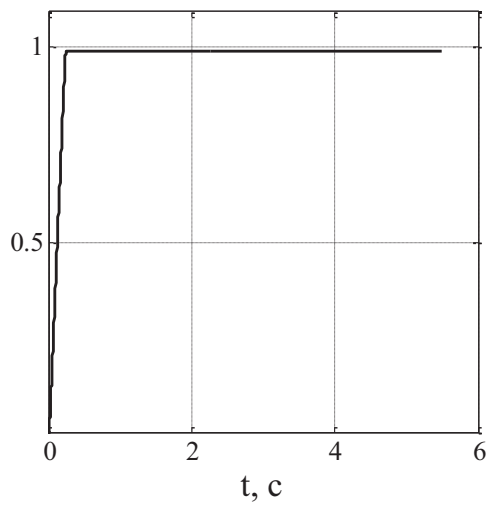
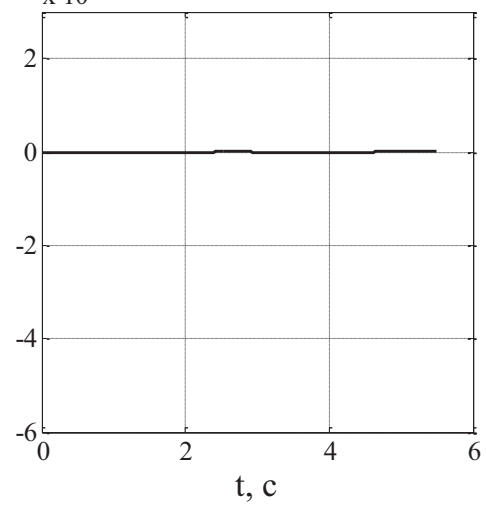
Проведемо дослідження роботи електромеханічної системи підвісної канатної дороги при зміні швидкості руху канатної дороги. Такі ситуації можуть мати сенс при переобладнанні канатної дороги або при різкому погіршенні погодних умов.

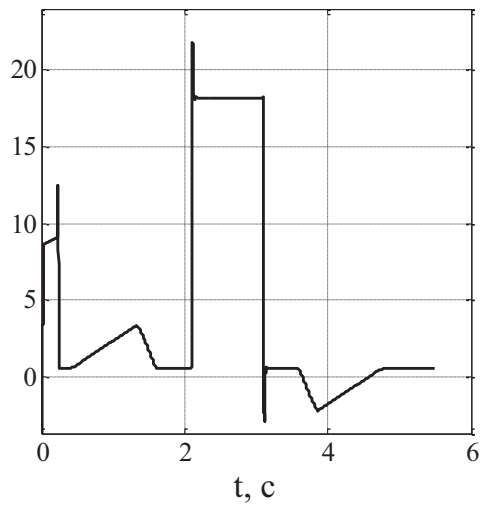
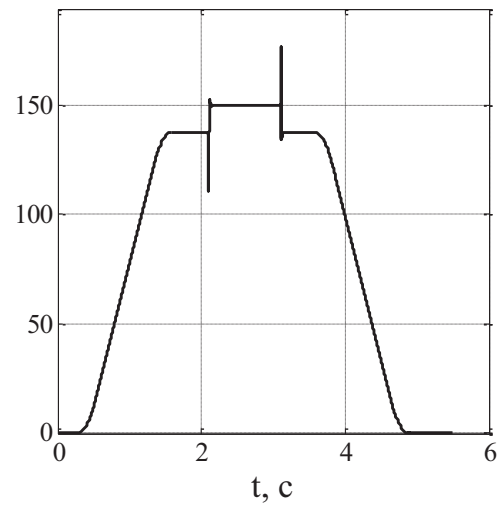
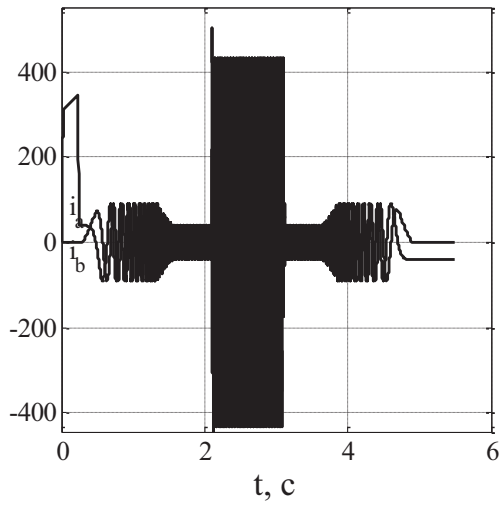
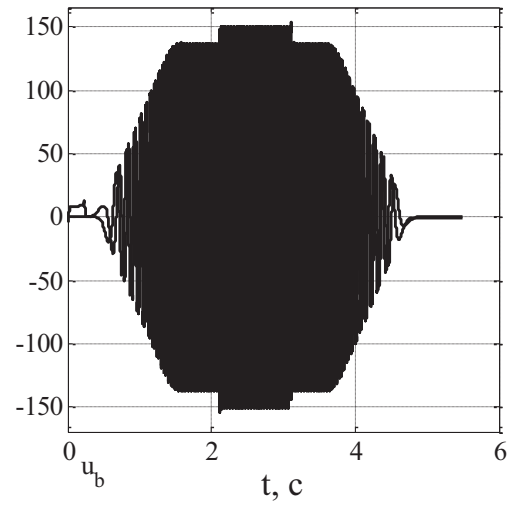
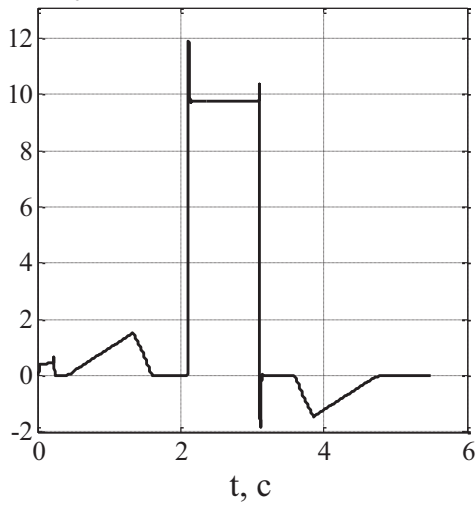
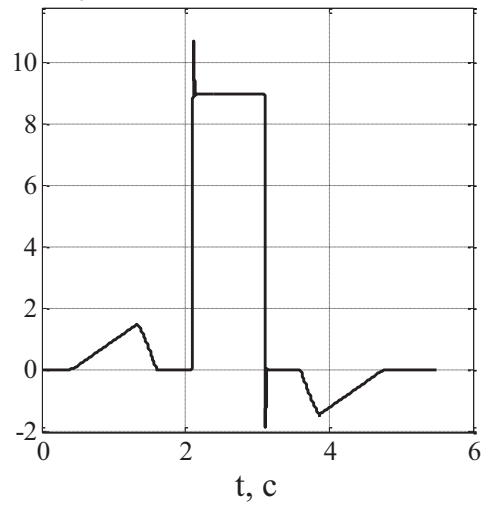
Дослідження буде проведено для наступних значень швидкості: $v=0.7v_n=1.6\text{ м/с}$ та $v=0.45v_n=1\text{ м/с}$ для двох значень моменту навантаження: номінального $M_c=M_{cn}=1286\text{ Нм}$ та мінімального $M_c=0.2M_{cn}=257.2\text{ Нм}$.

Графіки перехідних процесів роботи електромеханічної системи при лінійній швидкості, значення якої становить $v=0.7v_n=1.6\text{ м/с}$, приведено в Додаток 2.

Також проведемо дослідження при мінімально допустимій швидкості руху канатної дороги, а саме $v=1\text{ м/с}$. Графіки перехідних процесів роботи електромеханічної системи показано на рис. 5.11.



Заданий струм i_d^* , АЗаданий струм i_q^* , АПохибка струму \tilde{i}_d , АПохибка струму \tilde{i}_q , АПотокозчеплення ψ_d , ВбПотокозчеплення ψ_q , Вб

Напряга ротора u_d , ВНапряга ротора u_q , ВСтруми статора i_a та i_b , АНапряги статора u_a та u_b , ВПотужність активна P_a , Вт $\times 10^4$ Потужність механічна P_m , Вт $\times 10^4$ 

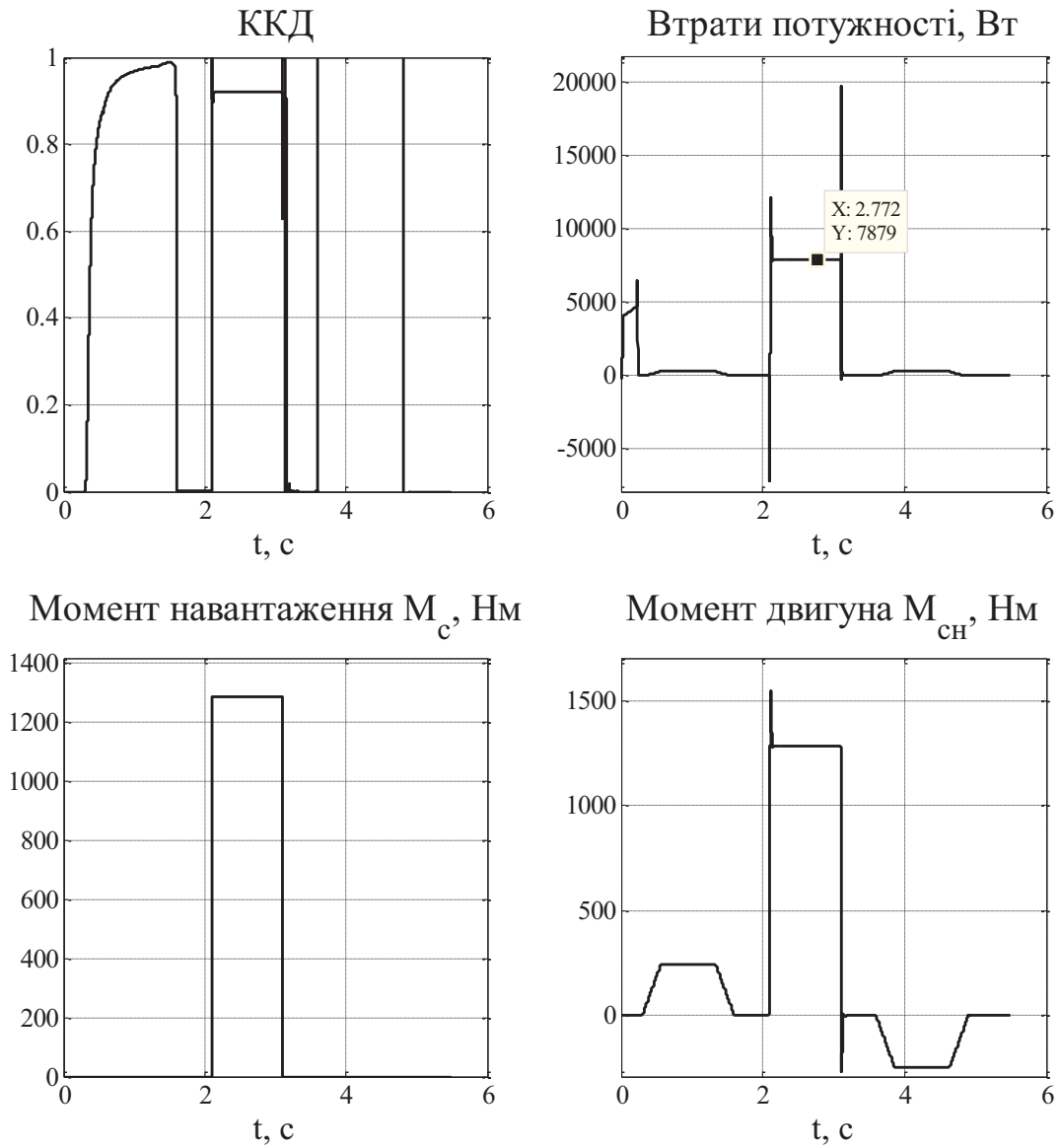


Рисунок 5.11 – Графіки перехідних процесів при $v=1\text{ м/с}$ та $M_c=M_{ch}=1286\text{ Нм}$

Наступним кроком проводиться дослідження впливу зміни швидкості при мінімальному навантаженні. Графіки основних перехідних процесів приведено на рис. 5.12 – 5.13.

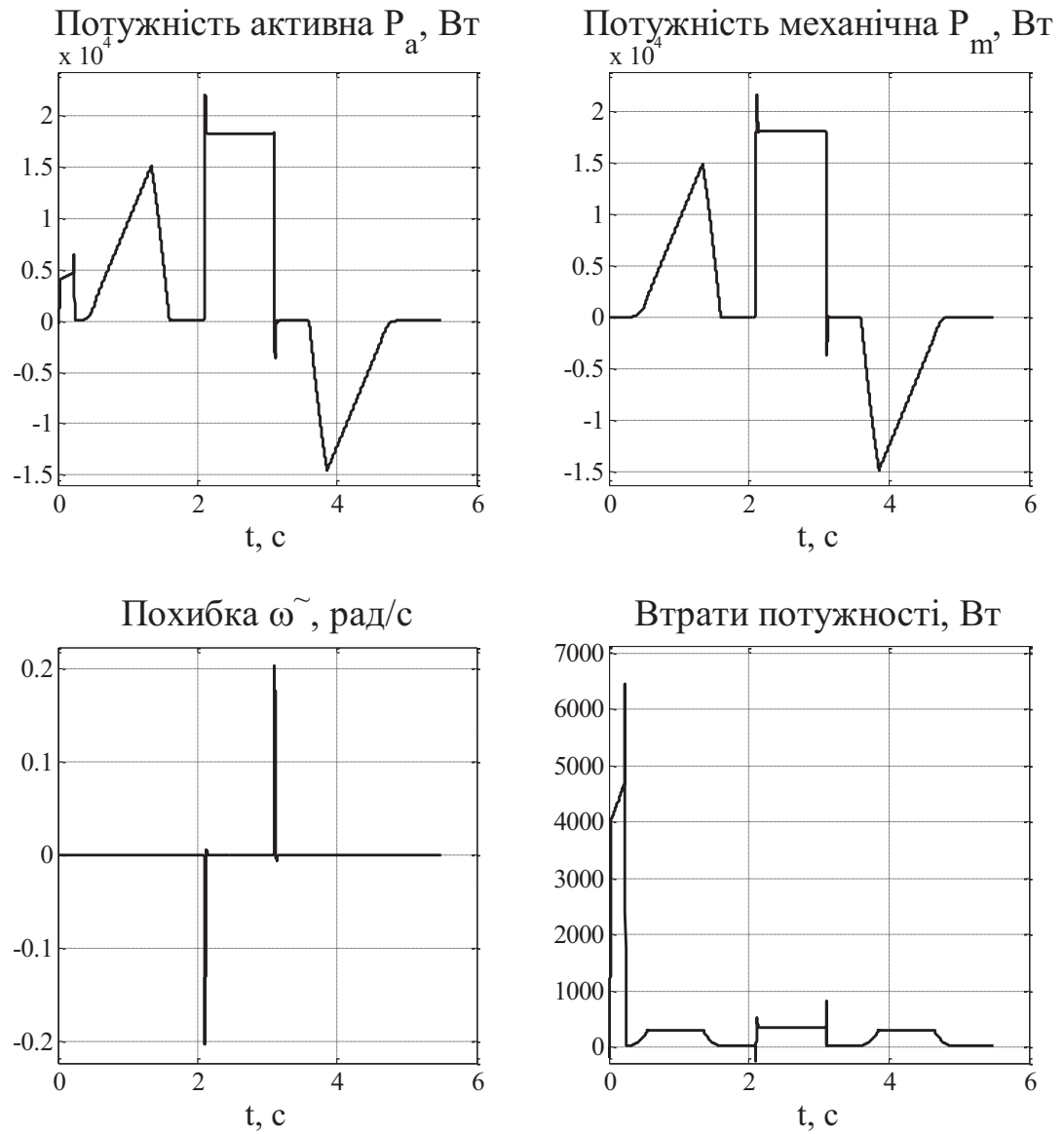
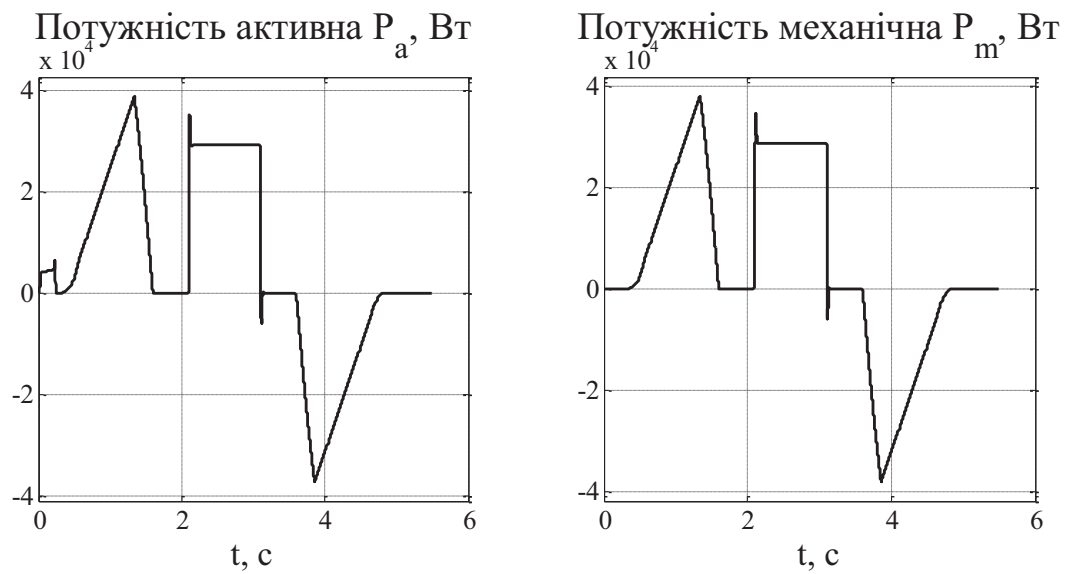


Рисунок 5.12 – Графіки перехідних процесів при $v=1\text{ м/с}$ та $M_c=0.2M_{\text{сн}}=257.2\text{ Нм}$



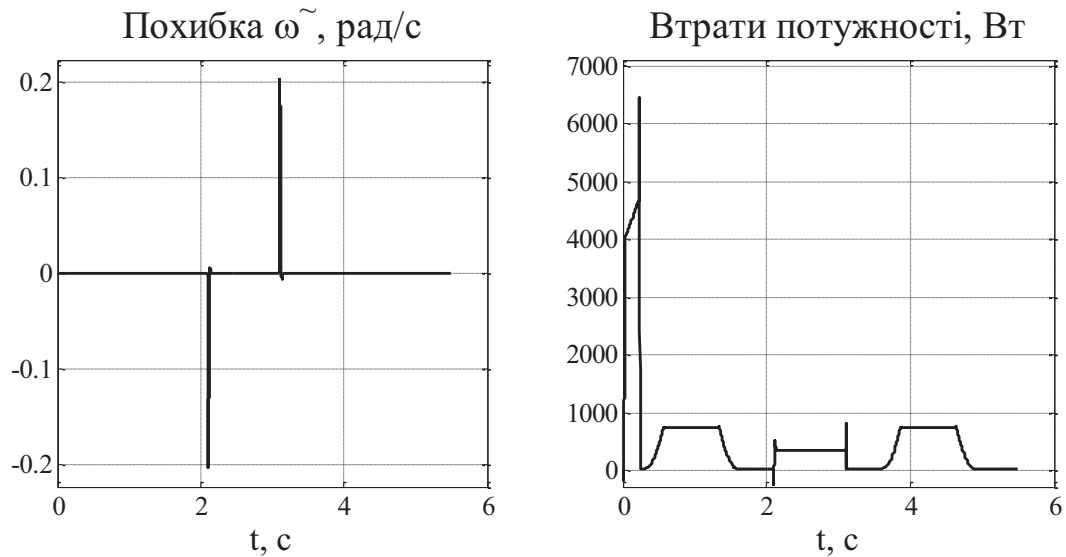


Рисунок 5.13 – Графіки перехідних процесів при $v=1\text{ м/с}$ та $M_c=0.2M_{\text{сн}}=257.2\text{ Нм}$

Як висновок з проведених досліджень зобразимо графіки втрат потужності та похибки по швидкості при різних швидкостях та мінімальному й номінальному моментах навантаження. Графіки зображені на рис. 5.14 - 5.16.

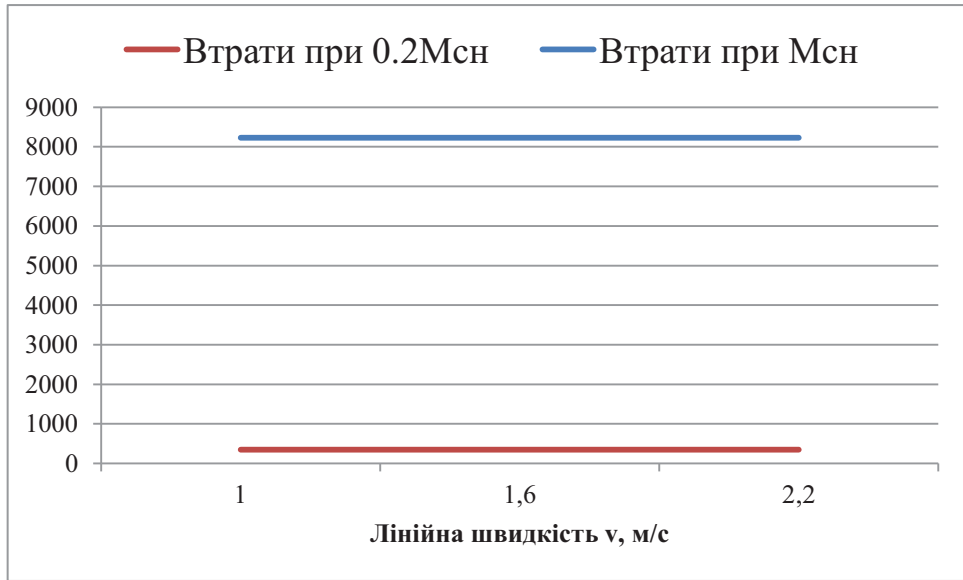


Рисунок 5.14 – Залежність втрат потужності при зміні швидкості та різних моментах навантаження

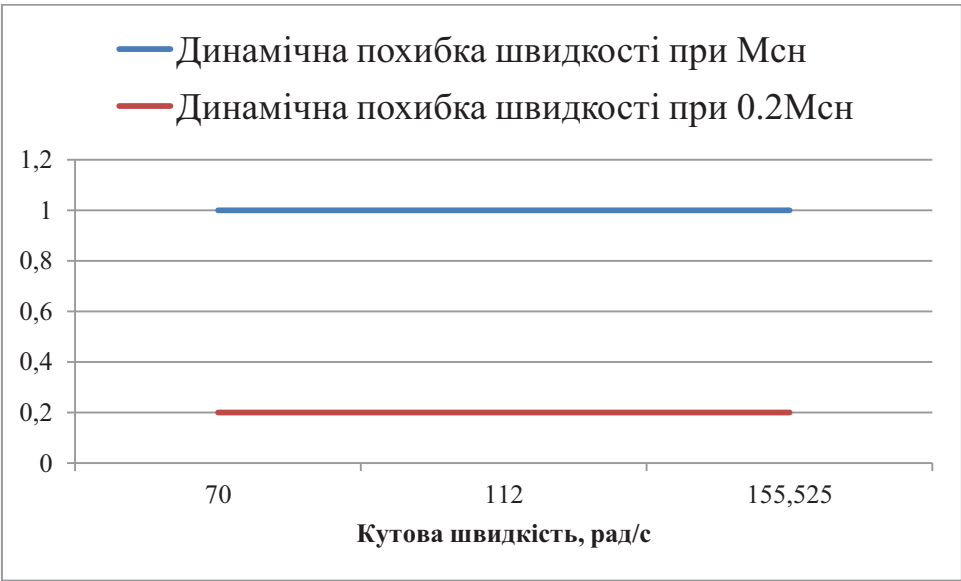


Рисунок 5.15 – Залежність динамічної похибки по кутовій швидкості при зміні швидкості та різних моментах навантаження

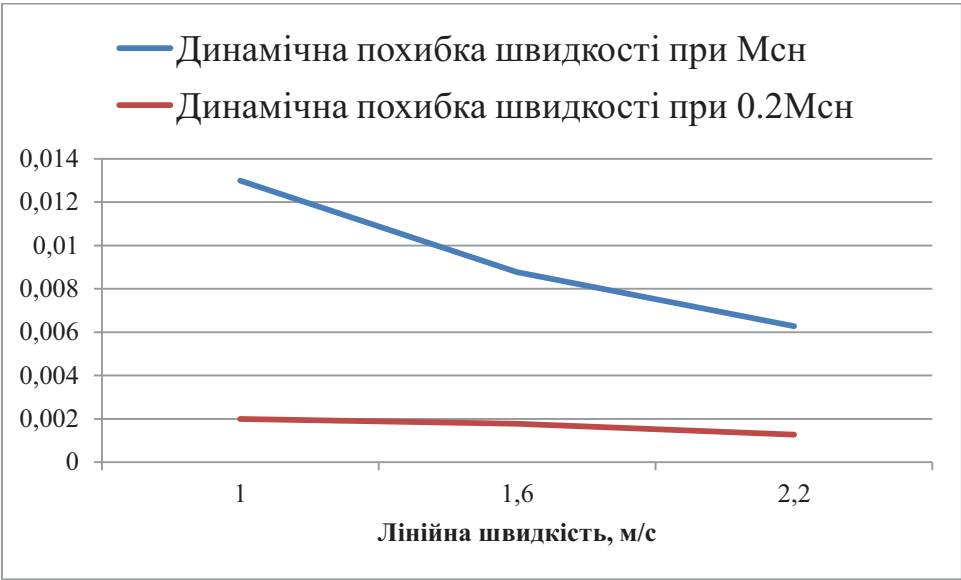


Рисунок 5.16 – Залежність динамічної похибки по лінійній швидкості при зміні швидкості та різних моментах навантаження

Для зручності аналізу характеристик переведемо показники втрат потужності у відсотки відносно втрат при номінальному навантаженні. Приведені показники у таб. 5.1.

Таблиця 5.1 – Показники потужностей та втрат потужності при різних навантаженнях.

M_c , Нм	P_a , Вт	P_m , Вт	Втрати P , Вт	Втрати P , %
257.2	40350	40000	345.9	0.857249
385.8	60740	60000	738.2	1.215344
514.4	81290	80000	1287	1.583221
643	102000	100000	1994	1.954902
771.6	122900	120000	2857	2.324654
900.2	143900	140000	3877	2.694232
1028.8	165100	160000	5054	3.061175
1157.4	186400	180000	6388	3.427039
1286	207900	200000	7879	3.789803
1414.6	229500	220000	9526	4.150763

Таблиця 5.2 – Залежність втрат потужності та похибки по швидкості від зміни навантаження

M_c	$0.2M_{ch}$	$0.3M_{ch}$	$0.4M_{ch}$	$0.5M_{ch}$	$0.6M_{ch}$	$0.7M_{ch}$	$0.8M_{ch}$	$0.9M_{ch}$	M_{ch}	$1.1M_{ch}$
ΔP , Вт	345.9	738.2	1287	1994	2857	3877	5054	6388	7879	9526
ΔP , %	0.85	1.21	1.58	1.95	2.32	2.69	3.06	3.42	3.78	4.15
$\tilde{\omega}$, рад/с	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.81	0.91	1.01	1.11
$\tilde{\omega}$, %	0.12	0.19	0.25	0.32	0.38	0.45	0.52	0.58	0.64	0.71

де $M_c = \frac{M_{ci}}{M_{ch}}$; $\Delta P_i = P_{a_i} - P_{m_i}$; $\Delta P_i, \% = \frac{P_{a_i} - P_{m_i}}{P_{a_i}} \times 100$; $\tilde{\omega}, \% = \frac{\tilde{\omega}_i}{\tilde{\omega}_H} \times 100$, P_{a_i} – споживана

активна потужність; P_{m_i} – механічна потужність на валу електродвигуна; $\tilde{\omega}_i$ – похибка по швидкості.

Висновки до п'ятого розділу

В цьому розділу розробки магістерської роботи проведено дослідження роботи електромеханічної системи підвісної канатної дороги. В ході досліджень виявлено, що обраний електродвигун, а також система керування в цілому добре витримують зміну навантажень та умов роботи. Зміна швидкості руху канатної дороги, а також зміна завантаженості не впливають критично на відпрацювання усіх необхідних режимів роботи.

Отримані результати показують, що при коливаннях моменту статичного навантаження від $0.2 M_{\text{сн}}$ до $1.1 M_{\text{сн}}$ втрати потужності змінюються в межах від 0.86%, або 345.9 Вт, при $M_c = 0.2 M_{\text{сн}}$ до 4.15%, або 9526 Вт, при $M_c = 1.1 M_{\text{сн}}$ від споживаної активної потужності. Динамічна похибка в даному діапазоні змін навантаження коливається в межах від 0.12% до 0.71% від номінальної швидкості, що є допустимим по умовам безпеки переміщення пасажирів за допомогою канатної дороги. Динамічна похибка по швидкості відпрацьовується в межах 0.1с. Після закінчення перехідного процесу швидкість руху тягового канату встановлюється на рівні заданої величини.

Виходячи з цього, система електроприводу з векторно-керованим асинхронним двигуном в повній мірі відповідає вимогам безпеки експлуатації канатно-транспортної системи безперервної дії і може бути рекомендована для використання при проектуванні нових, а також модернізації діючих систем підвісних канатних доріг.

РОЗДІЛ 6. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЄКТУ

Розроблену електромеханічну систему підвісної канатної дороги можливо впровадити у якості незамінного елементу гірського рекреаційного центру або просто гірсько-лижного курорту на Західній Україні. Використання цієї електромеханічної системи дозволить спроектувати нову систему обслуговування гірськолижного курорту або модернізувати вже діючу систему, при цьому отримати вигідне покращення по енергетичним характеристикам.

У цьому розділі проаналізовано розробку стартап-проєкту з урахуванням маркетингових та економічних аспектів.

У табл. 6.1-6.2. записано основні ідеї впровадження даного проєкту на ринок, а також перераховані недоліки і переваги проєкту.

Таблиця 6.1 – Опис основних ідей проєкту[24]

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Практична реалізація проєктування та впровадження у користування запропонованої електромеханічної системи у нові та діючі системи гірсько-лижних центрів. Використання такої ЕМС надає більшої варіативності системі і при цьому покращує динамічні показники.	1. Гірсько-лижні курорти	Покращення динамічних показників роботи ЕМС
	2. Гірські рекреаційні центри	Отримання більшої варіативності керування ЕМС

Таблиця 6.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту[24]

№ п/ п	Техніко- економічні характерист ики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W	N	S
		Мій проект	Конку рент №1	Конку рент №2	Конку- рент №3			
1.	Можливість змінювати швидкість руху тягового канату	Так	Ні	Ні	Ні			+
2.	Низькі похибки відпрацюван ня динамічних режимів	Так	Ні	Так	Так		+	
3.	Низькі значення втрат потужності	Так	Ні	Ні	Ні			+
4.	Собівартість	Висока	Низька	Низька	Висока		+	

Беручи за основу переваги та недоліки розробленого проекту оцінюємо його конкурентоспроможність на ринку.

У таблиці 6.3 проведено аудит технологій створення товару.

Таблиця 6.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту[24]

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.	Розробка підвісної канатної дороги для перевезення лижників	Розраховані елементи ПКД	Наявна	Доступна
		Розрахунок елементів системи ПКД під нові параметри	Наявна	Доступна

Продовження таблиці 6.3				
2.	Встановлення та налагодження ЕМС.	Самостійна наладки системи	Необхідно доробити	Доступна
		Проведення наладки кваліфікованими спеціалістами	Наявна	Доступна
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: використання розрахованих елементів системи ПКД та проведення наладки ЕМС кваліфікованими спеціалістами, так як ці технології є в наявності та доступності, і можуть бути виконані власне розробником проекту.				

У таб. 6.4-6.13 проаналізовано ринкові можливості запропонованого товару.

Таблиця 6.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту[24]

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	3
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	1020000
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу	Необхідність володіння територією
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Є
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	ARR=18%

Таблиця 6.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту[24]

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп	Вимоги споживачів до товару
-------	--------------------------	--	--	-----------------------------

			клієнтів	
Продовження таблиці 6.5				
1.	Необхідність мінімізації втрат потужності та найвигідніших енергетичних показників	Власник території в гірській місцевості або власник вже діючої ПКД	Власникам діючих ПКД не потрібен проєкт нової ПКД, лише оновити ЕМС.	Нова ЕМС або вся ПКД повинна справно працювати, а компанія зобов'язана забезпечити наладку спеціалістами.

Таблиця 6.6 – Фактори можливих загроз[24]

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Конкуренція	Наявність існуючих великих авторитетних компаній постачальників на ринку	Пропозиція існуючій великій компанії придбати ідею розробленого проєкту або розширення власної рекламної кампанії.
2.	Вартість	Відносно висока вартість реалізації запропонованого товару	Пошук можливостей заміни елементів альтернативними нижчої собівартості при реалізації проєкту.

Таблиця 6.7 – Фактори можливостей[24]

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії

Продовження таблиці 6.7			
1.	Зростання потреб потенційних покупців	Модернізація розробленої ПКД або ЕМС	Підлаштування параметрів та елементів систем в залежності від потреб користувача
2.	Вихід на міжнародний ринок	Модернізація розробленої ПКД або ЕМС	Налагодження стосунків з існуючими міжнародними компаніями.

Таблиця 6.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку[24]

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства
1. Монополія	Присутні 3 великі основні компанії	Виникнення проблем при вході на ринок. Потреба налагодження комунікації
2. Міжнародний рівень конкурентної боротьби	Дві компанії українські, одна –міжнародна	Створення групи спеціалістів для проведення необхідних робіт та наладок
3. Міжгалузева	Товари запропоновані конкурентами 1 та 2 також можуть бути використані на ринку.	Впровадження пропонованої ЕМС в інші галузі транспортерів
4. Товарно-родова	Види товарів конкурентів є різними, так як вони використовують електроприводи плавного пуску.	Розроблена ЕМС надає змогу зменшити значення втрат та більшу варіативність керування
Продовження таблиці 6.8		

5. Не цінова	Покращення алгоритмів управління ЕМС	Використання більш дешевих внутрішніх елементів при реалізації.
6. Марочна	Конкуренти - відомі брендами в даному сегменті ринку	Створення самодостатніх систем ПКД або кооперація з існуючими компаніями.

Таблиця 6.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером [24]

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
	Навести перелік прямих конкурентів	Визначити бар'єри входження в ринок	Визначити фактори сили постачальників	Визначити фактори сили споживачів	Фактори загроз з боку замінників
Висновки:	На ринку є три компанії конкуренти. Кожен конкурент пропонує товар схожий, але з певними відмінностями від запропонованого.	Бар'єри входу в ринок можливі, оскільки конкуренти пропонують системи дешевші ніж розроблена.	Без постачальників. Компанія напругу узгоджувати має умови закупки та доставки з покупцем.	Клієнти визначають необхідні технічні та цінові характеристики продуктів та можуть обирати більш відомі марки.	Товари-замінники можуть виконувати основні функції системи керування електроприбором з меншими витратами.

Таблиця 6.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності[24]

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проєктів значущим)
1.	Низькі втрати енергії та низькі похибки відпрацювання	Цей фактор робить товар конкурентно спроможним, адже являється вигіднішим у роботі за конкурентів
2.	Можливість змінювати швидкість руху канатної дороги	Цей фактор робить товар конкурентно спроможним. Адже надає варіативності керуванню і більше захищений від впливу погодних умов або зміни навантаження.

Таблиця 6.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін системи ПКД[24]

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з запропонованим проєктом						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Низькі втрати і похибки	19			+				
2	Зміна швидкості руху	18	+						

Таблиця 6.12 – SWOT- аналіз стартап-проєкту[24]

Сильні сторони: низькі втрати енергії, можливість зміни швидкості руху	Слабкі сторони: відносна висока собівартість проєкту.
Можливості: можливість переобладнання системи та вихід на міжнародний ринок.	Загрози: висока конкуренція, необхідність наявності переїздної групи спеціалістів для наладки та тестування системи, втрата можливих клієнтів в наслідок високої собівартості.

Таблиця 6.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проєкту[24]

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1.	Використання власно розробленого та розрахованого проєкту та наладка спеціалістами, наприклад розробником проєкту, що є більш швидким рішенням.	99%	5 місяців
2.	Модернізація проєкту в залежності від потреби замовника та наладка спеціалістами, наприклад розробником проєкту. Це є довшим рішенням проєкту.	99%	9 місяців

Базуючись на проведеному аналізі ринкової можливості старту проєкту, робимо висновок, що орієнтовний комплекс заходів №1 є більш привабливим для клієнта, оскільки строки виконання менші.

Результати розроблення ринкової стратегії проєкту представлені в табл. 6.14-6.17.

Таблиця 6.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів[24]

№ п/ п	Опис профілю цільової групи потенційни х клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовни й попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивніст ь конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Власники території для побудови гірсько- лижного курорту	Імовірна поява бажання персоналізації проекту	Покупці зацікавлять ся подібною системою заради зменшення енергетичн их втрат	Присутні три конкуренти. Їх продукція не повністю володіє схожими властивостя ми і ідентичними показниками якості.	Під час входу на ринок можуть виникнути завади через високу вартість
2.	Власники гірсько- лижного курорту з застарілим обладнання м.	Підвищення енергоефективно сті та поява додаткової можливості керування буде привабливою для покупців		Так як система є вигідною енергетичн о та надає нові можливост і вхід на ринок буде полегшено	
Які цільові групи обрано: основна цільова група – власники території для побудови гірсько-лижного курорту, додаткова – власники гірсько-лижного курорту з застарілим обладнанням.					

Таблиця 6.15 – Визначення базової стратегії розвитку[24]

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1.	Розроблений власноруч проєкт та налаштування системи спеціалістами, наприклад розробником проєкту.	Концентрований маркетинг.	Висока енергоефективність і динамічні показники та більша варіативність керування.	Стратегія спеціалізації.

Таблиця 6.16 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки[24]

№ п/п	Чи є проєкт «першопрохідцем» на ринку?	Пошук нових споживачів, або забирання існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1.	Ні.	Шукати нових покупців.	Так, тільки елементи підвісної канатної дороги без ЕМС.	Стратегія заняття конкурентної ніші.

Таблиця 6.17 – Визначення стратегії позиціонування[24]

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформулювати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
1.	Система ПКД повинна справно працювати згідно з умовами експлуатації. Спеціалісти компанії повинні налаштувати ЕМС.	Стратегія спеціалізації.	Високі динамічні показники, висока енергоефективність, варіація керування	Нижчі втрати потужності, низькі похибки відпрацювання, можливість керування швидкістю.

Розроблення маркетингової програми стартап-проекту наведено у табл. 6.18-6.22.

Таблиця 6.18 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару[24]

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
1.	Справна робота системи згідно умов експлуатації	Продукт розроблено відповідно до вимог експлуатації.	Система ПКД справно працює та не критично реагує на зміни погодних умов або навантаження, оскільки і була для цього розроблена.
2.	Налаштування та тестування спеціалістами	Мобільна група спеціалістів компанії для налаштування та тестування продукту.	Клієнт тільки сплачує замовлення, а всі організаційні моменти вирішує компанія

Таблиця 6.19 – Опис трьох рівнів моделі товару[24]

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Товар за задумом	Систему розроблено для перевезення лижників у гірсько-лижному курорті		
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	1. Висока енергоефективність 2. Можливість зміни швидкості руху канату 3. Простота технічної експлуатації	-	-
	За бажанням клієнту налаштування та тестування системи буде проведено для кожного проєкту окремо спеціалістами компанії		
	Маркування присутнє		
	Запропонований проєкт. Система ПКД		
III. Товар із підкріпленням	Безкоштовне тестування ПКД вперше		
	Гарантійне надання команди спеціалістів для технічного обслуговування обладнання		
Захист інтелектуальної власності.			

Таблиця 6.20 – Визначення меж встановлення ціни[24]

№ п/п	Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1.	670000	510000	55000	500000 та 1000000

Таблиця 6.21 – Формування системи збуту[24]

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1.	Сплачують за проєктування системи ПКД та за обслуговування обладнання в разі виходу з ладу.	Продаж	0 – напряму	Власна та залучена

Таблиця 6.22 – Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1.	Придбання систем ПКД та використання їх для перевезення пасажирів	Живе спілкування, Інтернет сайт, соціальні мережи.	Висока енергоефективність, можливість зміни швидкості руху канату.	Зобразити переваги системи ПКД в тому числі і в порівнянні з товарами конкурентів.	Реклама в соціальних мережах, через Інтернет сайт живе спілкування з клієнтами.

Висновки до шостого розділу

В цьому розділі розроблено стартап-проект з продажу, впровадження в спеціалізоване використання, обслуговування, налаштування та тестування системи підвісної канатної дороги для перевезення пасажирів лижників в гірсько-лижних курортах. Проведено технологічний аудит ідеї, проаналізовано ринкові можливості старту проекту, а також розроблено ринкову стратегію поведінки.

Базуючись на дослідженнях можна сказати, що розроблений продукт може зацікавити як нових потенційних власників гірсько-лижного курорту, які володіють територією в гірській місцевості, так і власниками вже діючих підвісних канатних доріг, адже даний продукт являється досить конкурентноспроможним з ряду причин, описаних вище.

Так як динаміка ринку росте, то можна припустити, що при ефективній рекламній кампанії конкурентноспроможний товар може користуватись достатнім попитом для цієї категорії товарів. Базуючись на проведеному аналізі ринкової можливості, вирішено обрати базовою альтернативу №1, так як вона може бути реалізована за менш довгі строки.

Основними перешкодами для входу на ринок можуть бути авторитетні конкуренти та низька відомість розробника серед потенційних клієнтів, але виходячи з вигідності запропонованого продукту та його можливості і приймаючи до уваги, що даний стартап-проект буде захищено, як інтелектуальну власність, то можна припустити, що старт буде успішним.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В представленій магістерській дисертації розроблено математичну модель електромеханічної системи, проведено дослідження статичних та динамічних характеристик при варіаціях навантаження механізму та зміні швидкості руху тягового канату, проведено аналіз результатів досліджень та надано висновки про доцільність використання в електромеханічних системах підвісних канатних доріг асинхронного електродвигуна з векторним керуванням.

Отримано наступні результати:

1. В результаті проведених робіт забезпечено рішення всіх поставлених в дисертаційній роботі завдань.
2. В результаті розгляду варіантів систем електроприводів, відповідаючих вимогам технологічного процесу була відібрана, як найбільш раціональна система електроприводу з використанням векторно-керованого електродвигуна.
3. Базуючись на проведених розрахунках обрано перетворювач частоти виробництва компанії ABB серії ACS типу ACS550-02-368A-4, потужність перетворювача становить $P_n=220$ кВт. Обраний перетворювач частоти відповідає всім умовам та повністю сумісний для роботи з електродвигуном 4A315M4У3.
4. Було описано векторне керування асинхронним електроприводом призначеним для механізму підвісної канатної дороги. Також, представлено математичну модель асинхронного електродвигуна в стаціонарній системі координат (a-b) і алгоритм прямого векторного керування і структурну схему для нього.
5. Проведено дослідження роботи електромеханічної системи підвісної канатної дороги. В ході досліджень виявлено, що обраний електродвигун, а також система керування в цілому добре витримують зміну навантажень та умов роботи. Зміна швидкості руху канатної дороги, а також зміна

завантаженості не впливають критично на відпрацювання усіх необхідних режимів роботи. Отримані результати показують, що при коливаннях моменту статичного навантаження від $0.2 M_{\text{сн}}$ до $1.1 M_{\text{сн}}$ втрати потужності змінюються в межах від 0.86%, або 345.9 Вт, при $M_c = 0.2 M_{\text{сн}}$ до 4.15%, або 9526 Вт, при $M_c = 1.1 M_{\text{сн}}$ від споживаної активної потужності. Динамічна похибка в даному діапазоні змін навантаження коливається в межах від 0.12% до 0.71% від номінальної швидкості, що є допустимим по умовам безпеки переміщення пасажирів за допомогою канатної дороги. Динамічна похибка по швидкості відпрацьовується в межах 0.1с. Після закінчення перехідного процесу швидкість руху тягового канату встановлюється на рівні заданої величини.

6. Розроблено стартап-проект з продажу, впровадження в спеціалізоване використання, обслуговування, налаштування та тестування системи підвісної канатної дороги для перевезення пасажирів лижників в гірсько-лижних курортах. Проведено технологічний аудит ідеї, проаналізовано ринкові можливості старту проекту, а також розроблено ринкову стратегію поведінки.

Виходячи з цього, система електроприводу з векторно-керованим асинхронним двигуном в повній мірі відповідає вимогам безпеки експлуатації канатно-транспортної системи безперервної дії і може бути рекомендована для використання при проектуванні нових, а також модернізації діючих систем підвісних канатних доріг.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Земсков А.Н., Полетаев И.Г. Грузовые подвесные канатные дороги – перспективное средство транспортирования полезных ископаемых /Проектирование, производство и эксплуатация машин и механизмов для горнодобывающей промышленности. Сб. трудов, Пермь: ПКИ Горнефтемаш, 2003. – с. 24–30.
2. Дукельский А.И. –М.: Подвесные канатные дороги , 1966.- 4с- 130с.
3. Барташевський Станіслав Євгенович, Денищенко Олександр Валерійович. Патент: 122739. Канатна дорога, що містить несучий канат, на якому за допомогою котків встановлено пасажирські вагони, що з'єднані з тяговим канатом і через нього з шківом тертя приводної станції, площадки посадки і висадки пасажирів, натяжну станцію
4. Проектирование канатных дорог горных рекреационных центров: [Електронний ресурс]. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/proektirovanie-kanatnyh-dorog-gornyh-rekreatsionnyh-tsentrov/viewer>
5. Элементы подвешной канатной дороги: [Електронний ресурс]. – URL: <http://www.detalmach.ru/lect32.html>
6. Подвесные канатные дороги: [Електронний ресурс]. – URL: <http://transport.pto.org.ua/index.php/component/k2/item/188-12-6-4-podvesnye-kanatnye-dorogi>
7. Ромахин Н.Е. Конструкция и расчёт конвейера. - Старый Оскол: ТНТ, 2011.
8. Трёхфазные асинхронные электродвигатели серии 4А. Обозначение, расшифровка, характеристики типов двигателей. - URL: https://eti.su/articles/spravochnik/spravochnik_1809.html
9. Кравчик А. Э. Шлаф М. М. Асинхронные двигатели серии 4А:Справочник/А90. – М.: Энергоатомиздат, 1982.- 29с. – URL: <https://lektsii.org/14-78491.html>

10. Методичні вказівки до розрахунково-графічної роботи з дисципліни “Теорія мехатронічних систем ” для студентів денної форми навчання зі спеціальності “ Електромеханічні системи автоматизації та електропривід” / Укл. Пересада С.М., Ковбаса С.М. - К. : НТУУ “КПІ” , 2011 . – 82с.

11. Пересада С.М. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційних робіт для студентів напрямку підготовки 6.050702- «Електромеханіка» спеціальності 7.05070204 «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод» / С.М. Пересада, С.М. Ковбаса, С.С. Димко. – К: НТУУ «КПІ», 2014. – 43с.

12. IGBT ключ типу FF300R12KE3B2HOSA1: [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.compel.ru/infosheet/INFIN/FF300R12KE3B2HOSA1>

13. Алюмінієвий конденсатор типу HCGWA2G503XK283 : [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.compel.ru/infosheet/HIT-AIC/HCGWA2G503XK283>

14. Діодний модуль типу R7001204XXUA : [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.compel.ru/infosheet/PWX/R7001204XXUA>

15. Зарядний резистор типу HSA253R3J : [Електронний ресурс]. – URL: <https://www.digikey.com/en/products/detail/te-connectivity-passive-product/HSA253R3J/2366281>

16. Датчик напруги типу LV 25-1200: [Електронний ресурс]. – URL: <http://www.klaster-plus.ua/shop/dispatcherizaciya/datchiki/datchiki-napryazheniya/datchik-napryazheniya-lem-lv25-p-sp5/>

17. Датчик струму типу HAL 400-S: [Електронний ресурс]. – URL: <https://ru.farnell.com/lem/hal-400-s/current-transducer-400a-panel/dp/1617415>

18. Каталог перетворювачів частоти ABB: [Електронний ресурс]. – URL: <https://chastotnik.com.ua/ABB-r-ACS550-02-368A-4>

19. С.М. Пересада, докт. техн. наук, М.А. Коноплінський, асист., В.М. Трандафілов, асп. Векторне керування моментом асинхронного двигуна, адаптивне до варіацій активних опорів статора і ротора, побудоване на основі нелінійного принципу розділення. Національний технічний університет України "Київський політехнічний університет", 2014. 6 с.

20. Novonty D. W. and Lipo T. A. Vector Control and Dynamics of AC Drives: monography. New York: Oxford University Press Inc, 2000. 324 p.

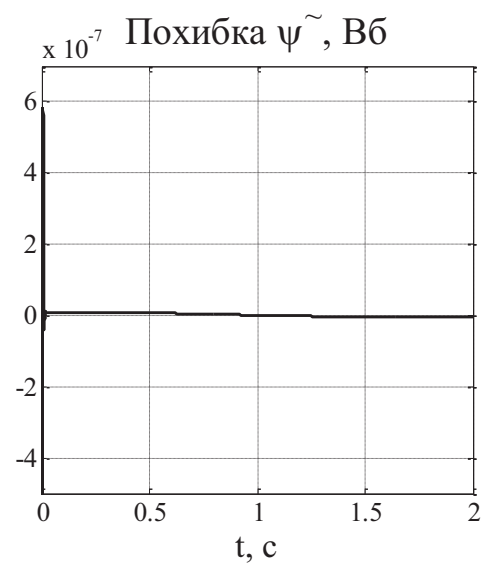
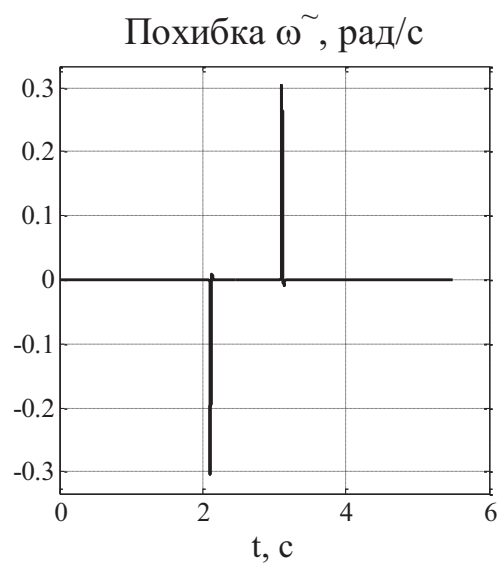
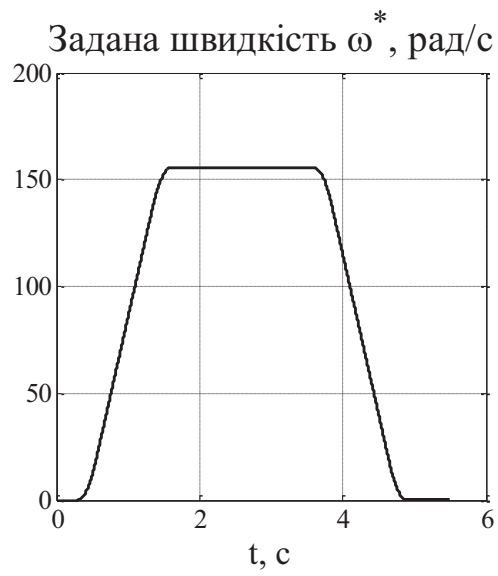
21. Д. С. Димко, асп.. Векторне керування асинхронними двигунами з максимізацією співвідношення момент-струм статора, 2015. 29 с.

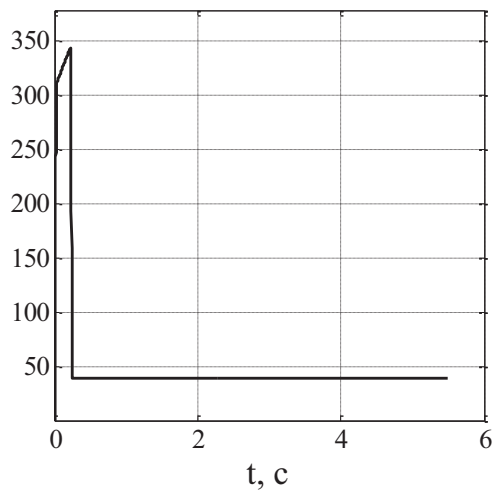
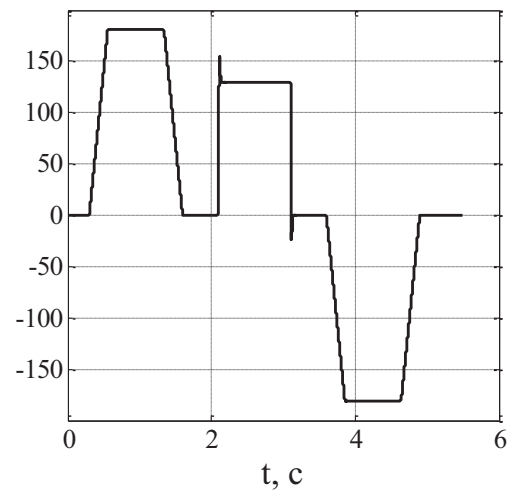
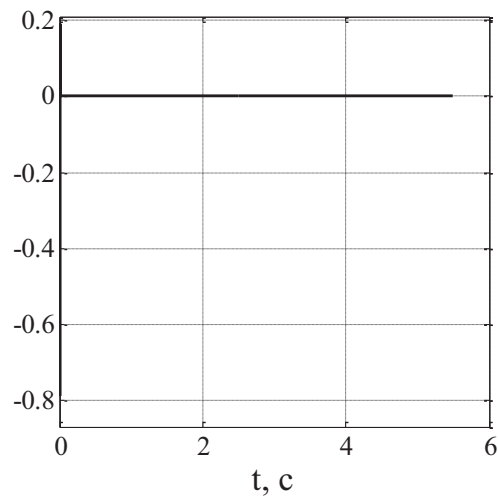
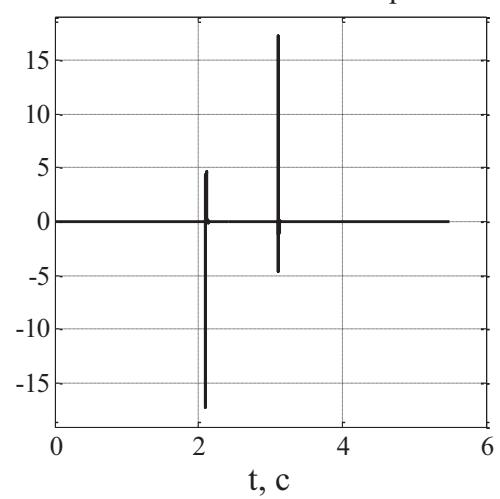
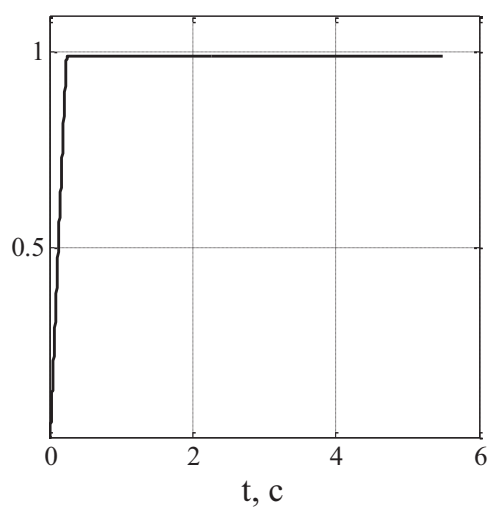
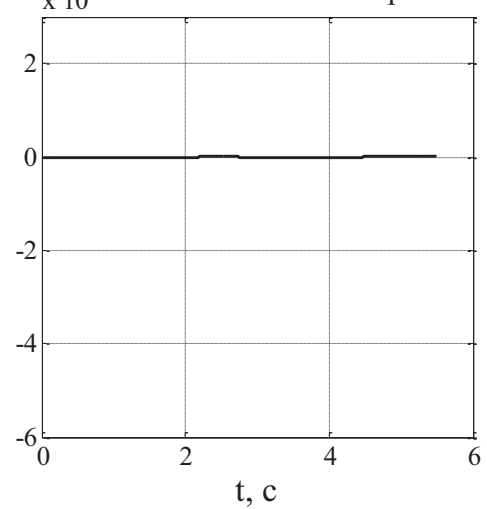
22. Автоматизація електромеханічних систем. курсовий проект. Методичні вказівки до виконання курсового проекту для студентів напрямку підготовки 6.050702 – "Електромеханіка" спеціальності "Електромеханічні системи автоматизації та електропривод" / Уклад: С. М. Пересада, С. М. Ковбаса, С. С. Димко, К.: НТУУ "КПІ", 2014 р., 43 с.

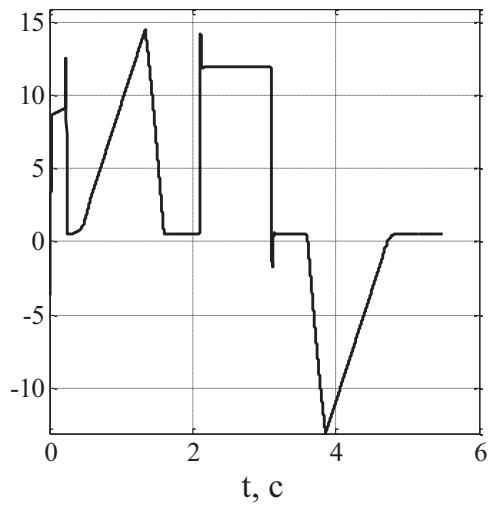
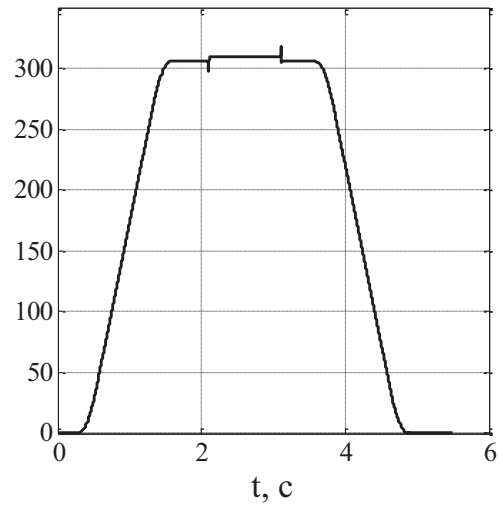
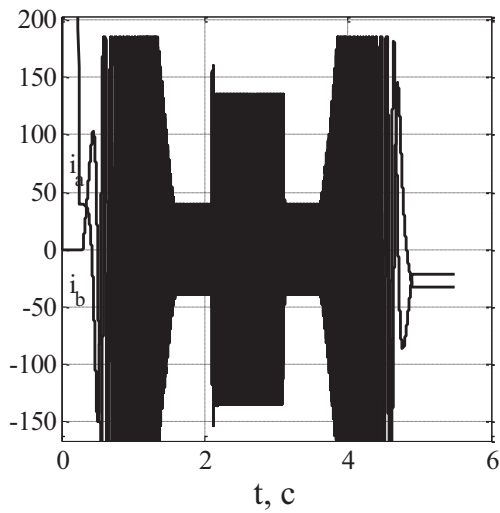
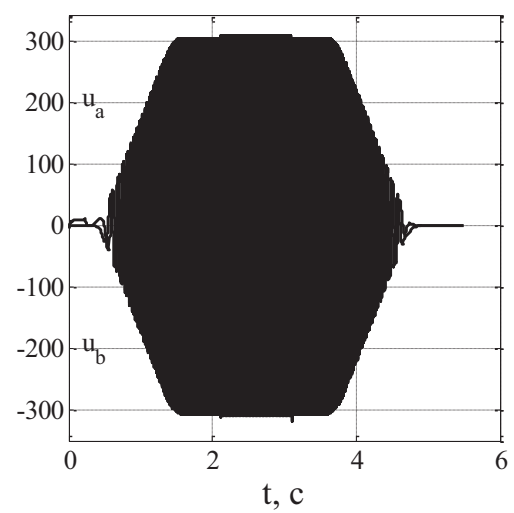
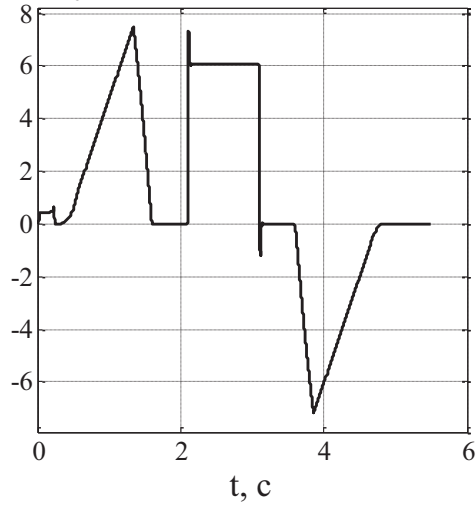
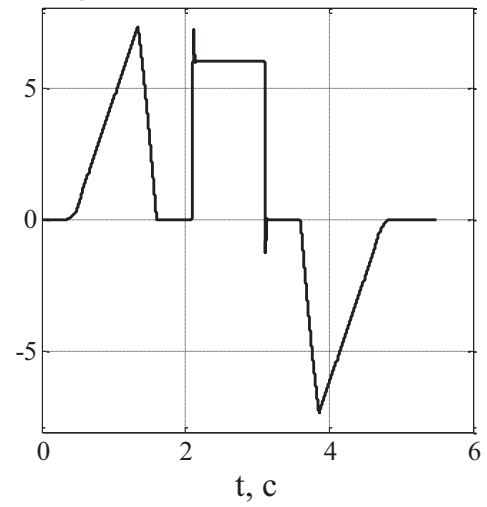
23. Пересада С.М., Ковбаса С.М. – Узагальнений алгоритм прямого векторного керування асинхронним двигуном // Тем. Електродинаміка. – 2002. – 17с – 22с.

24. Розроблення стартап-проєкту [Електронний ресурс] : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 28 с.

ДОДАТОК 1



Заданий струм i_d^* , АЗаданий струм i_q^* , АПохибка струму \tilde{i}_d , АПохибка струму \tilde{i}_q , АПотокозчеплення ψ_d , ВбПотокозчеплення ψ_q , Вб

Напряга ротора u_d , ВНапряга ротора u_q , ВСтруми статора i_a та i_b , АНапряги статора u_a та u_b , ВПотужність активна P_a , Вт $\times 10^4$ Потужність механічна P_m , Вт $\times 10^4$ 

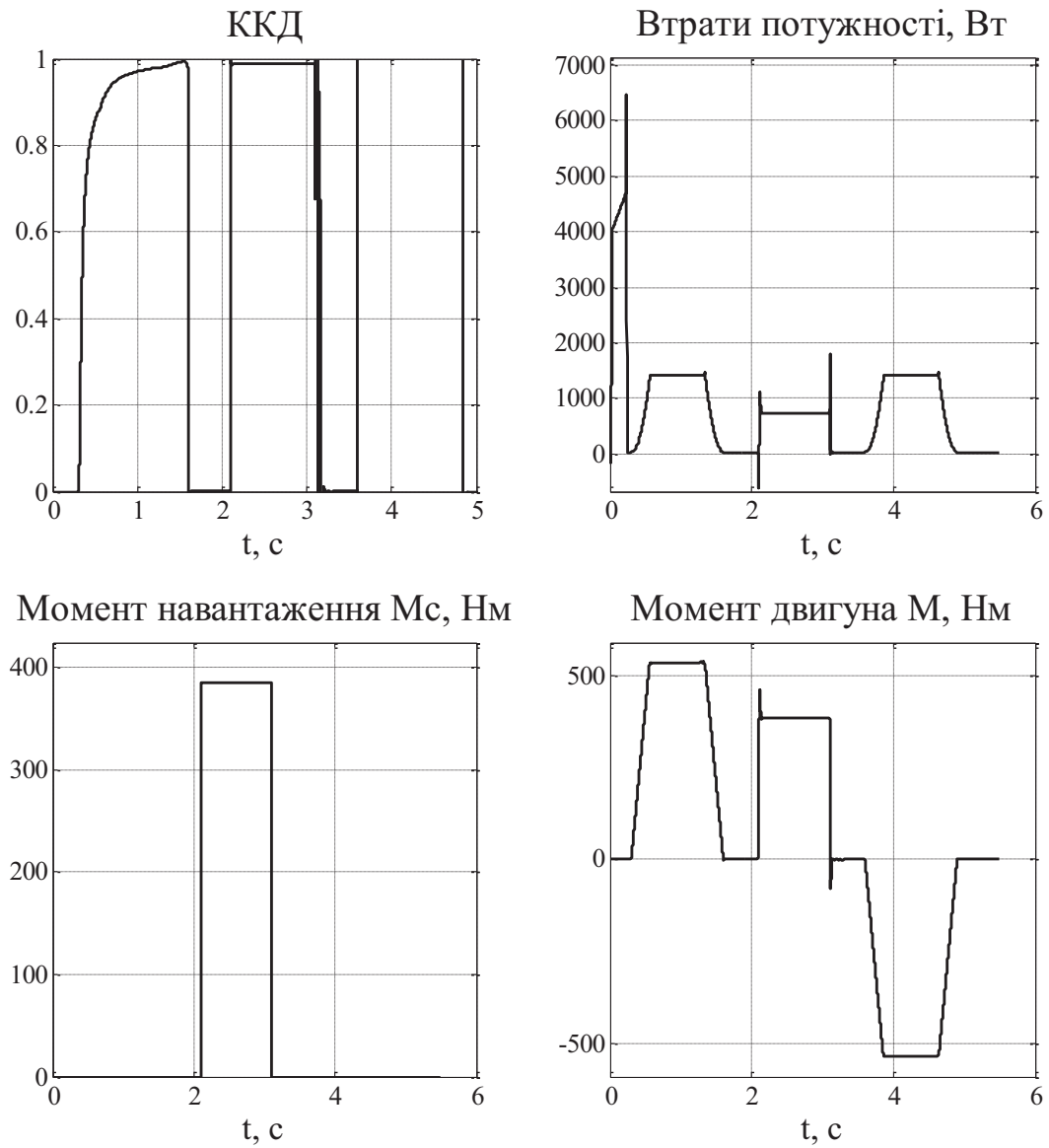
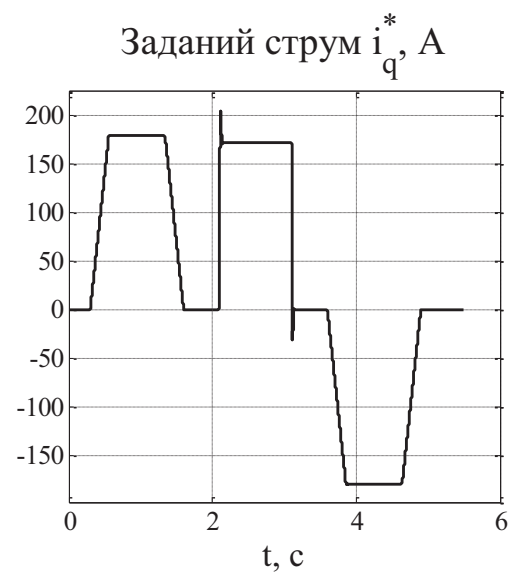
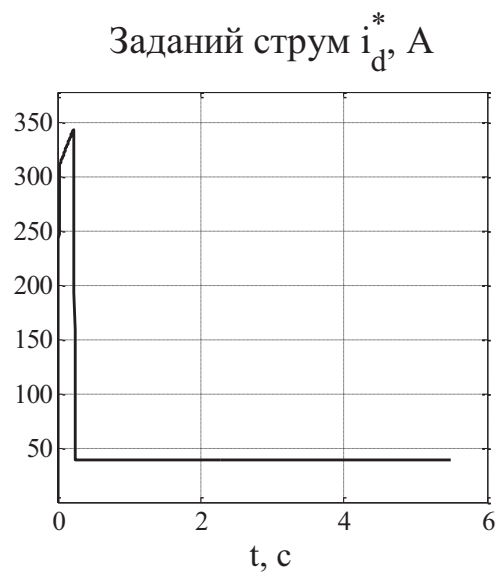
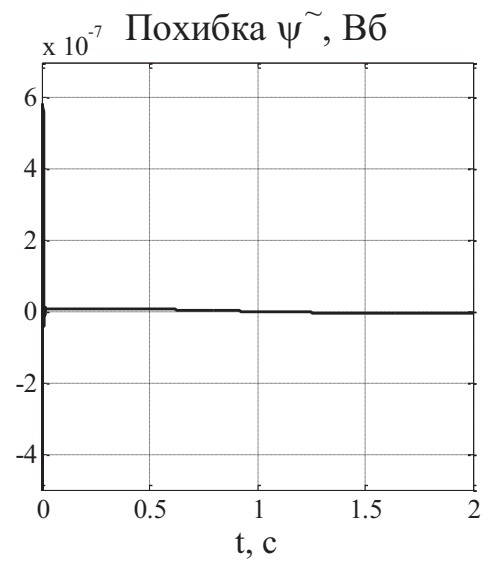
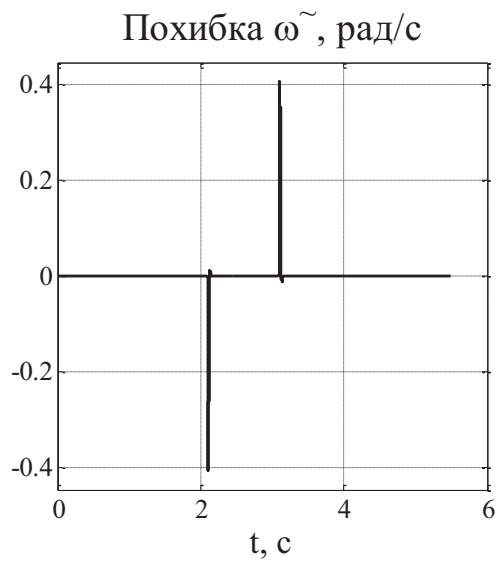
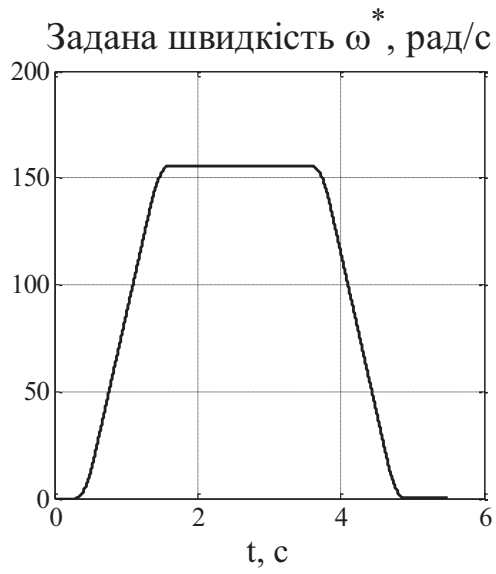
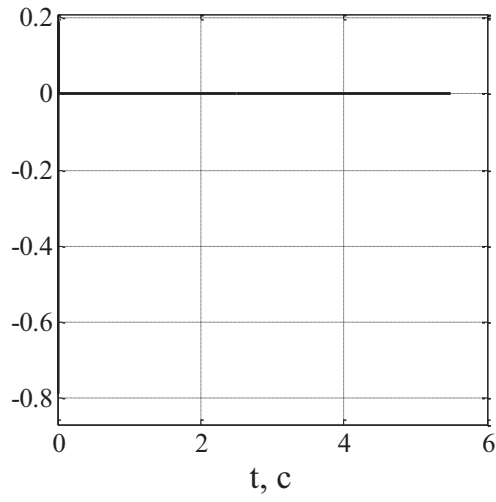


Рисунок 1 – Перехідні процеси при значенні $M_c = 0.3M_n = 385.8 \text{ Нм}$

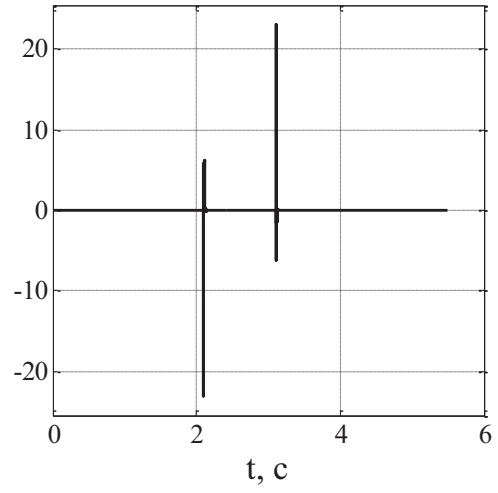
Промодельюємо роботу електромеханічної системи при значенні $M_c = 0.4M_n = 514.4 \text{ Нм}$.



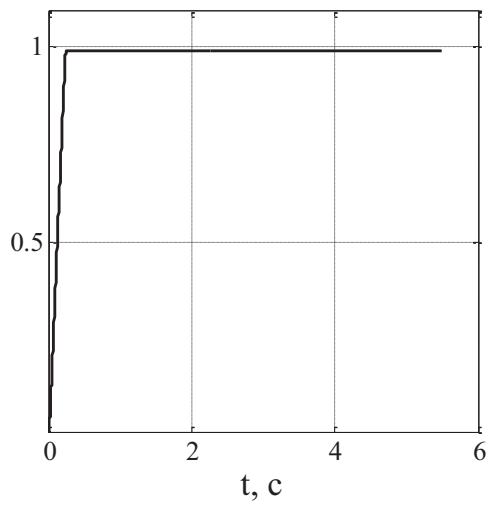
Похибка струму \tilde{i}_d , А



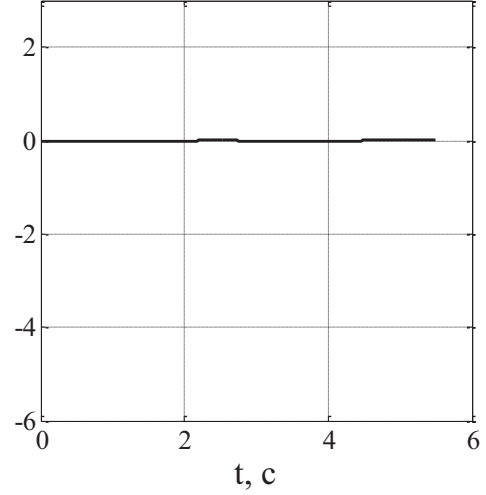
Похибка струму \tilde{i}_q , А



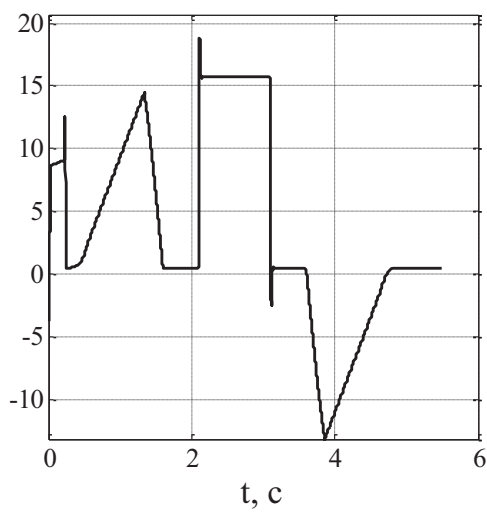
Потокозчеплення ψ_d , Вб



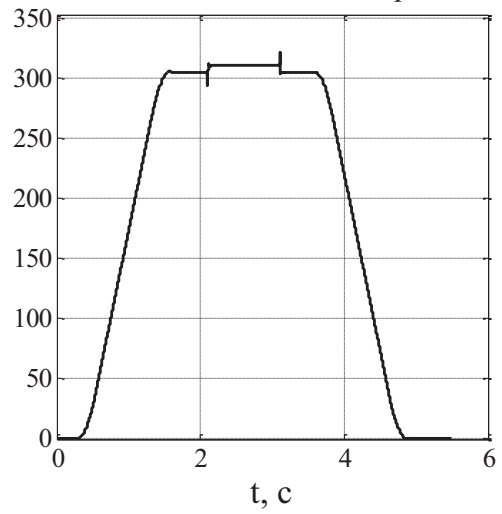
Потокозчеплення ψ_q , Вб

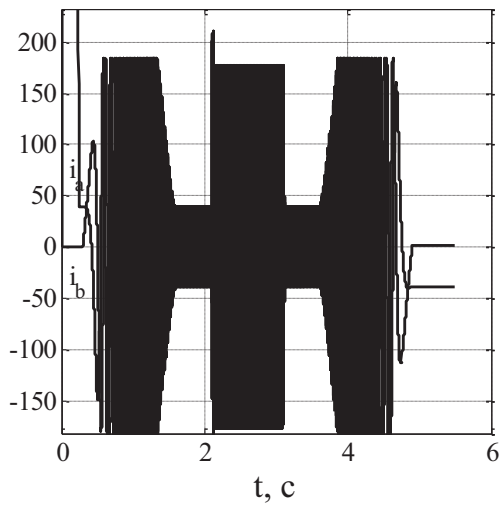
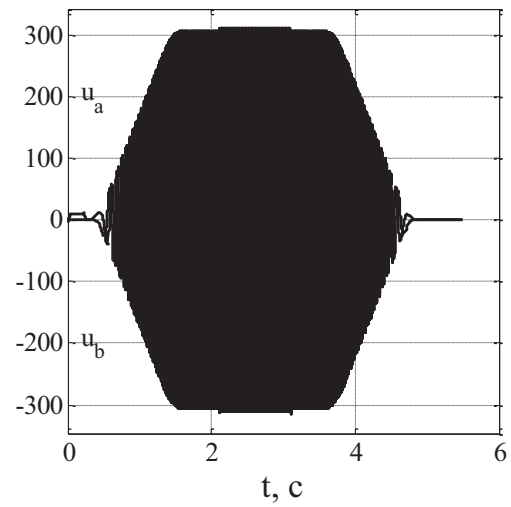
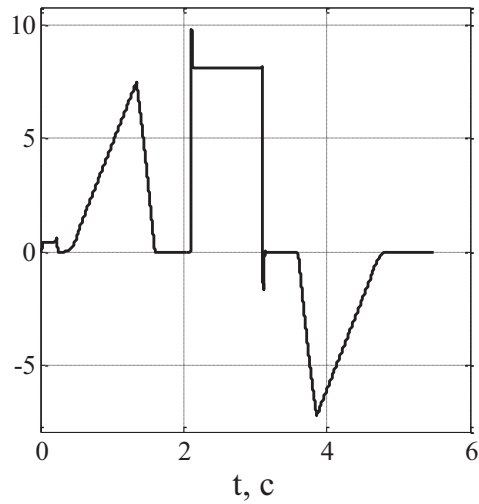
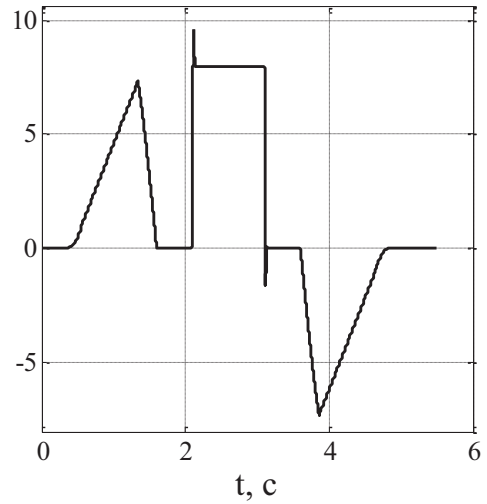


Напруга ротора u_d , В

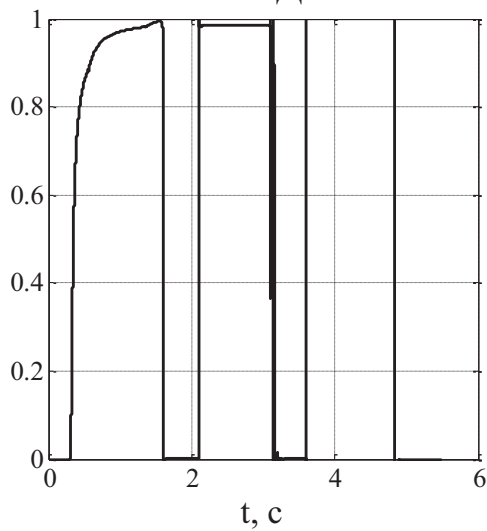


Напруга ротора u_q , В

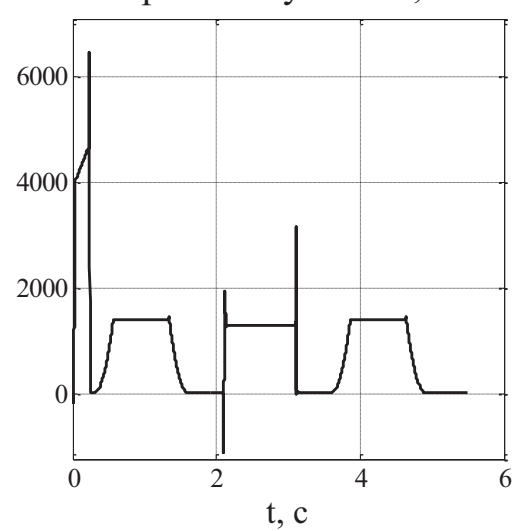


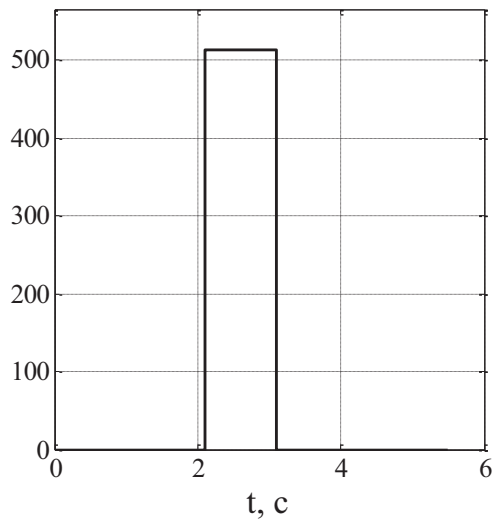
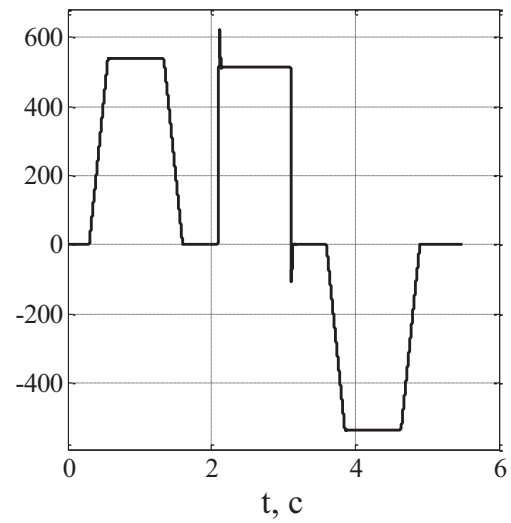
Струми статора i_a та i_b , АНапруги статора u_a та u_b , ВПотужність активна P_a , Вт
 $\times 10^4$ Потужність механічна P_m , Вт
 $\times 10^4$ 

ККД

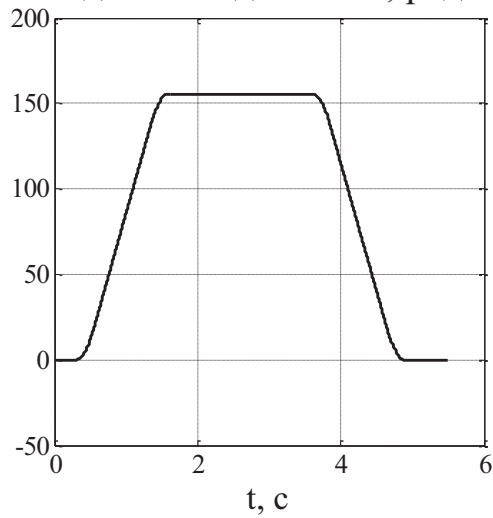
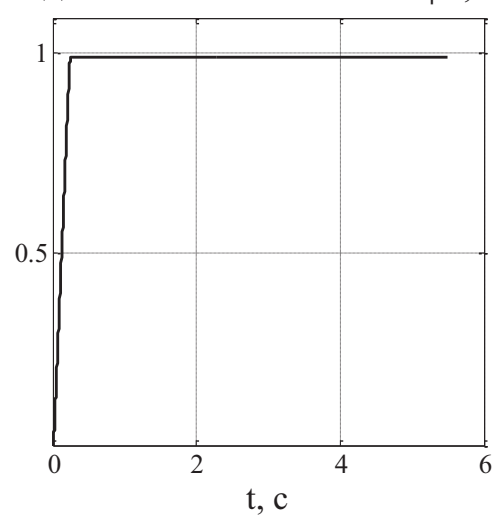


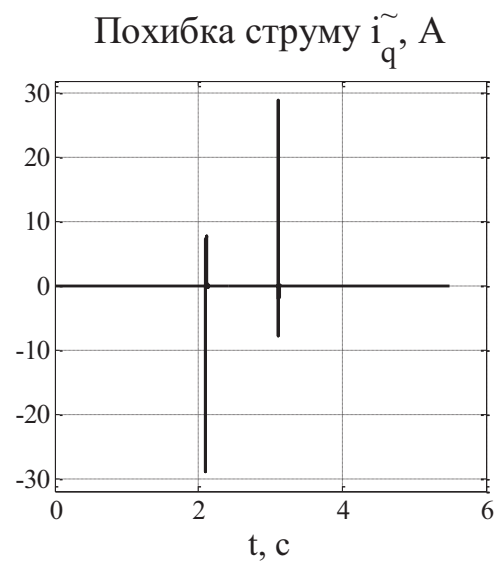
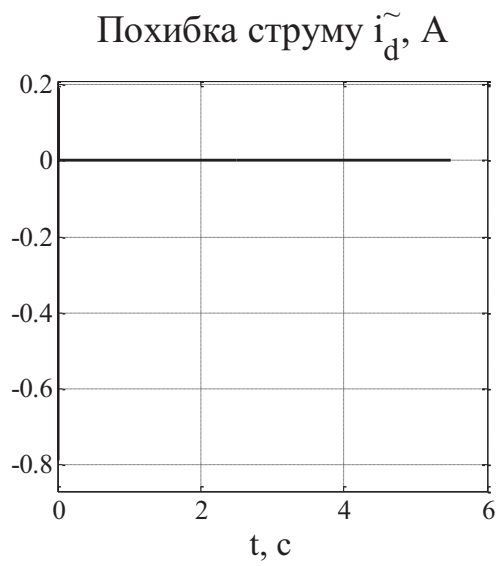
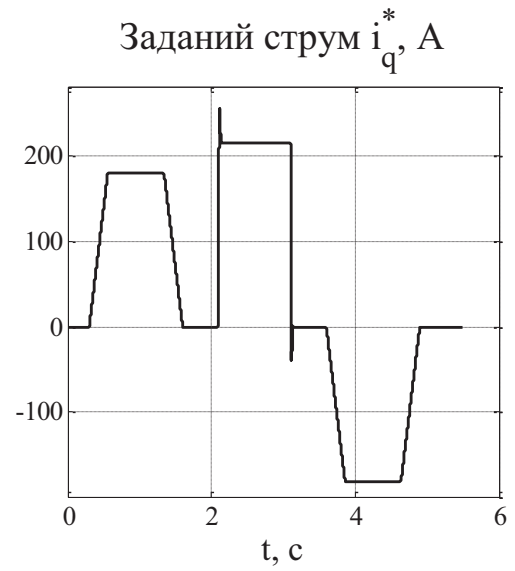
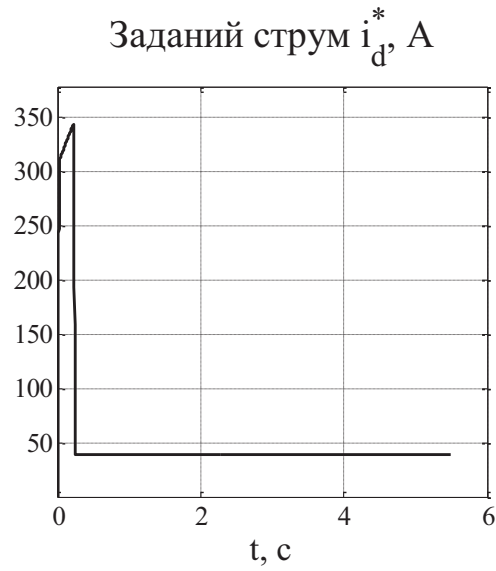
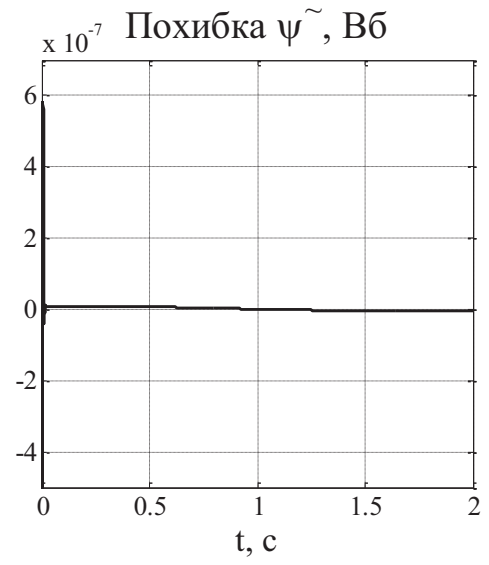
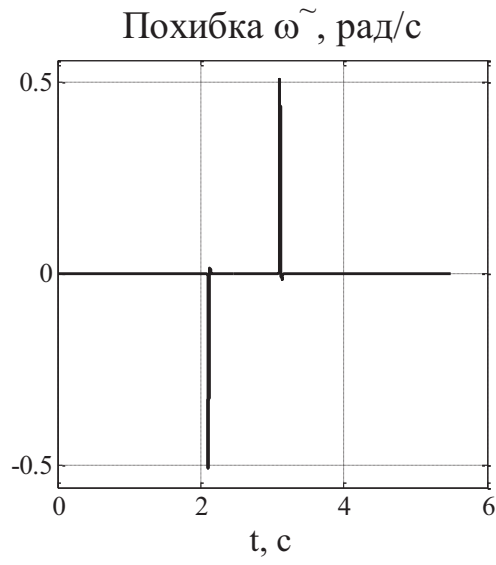
Втрати потужності, Вт

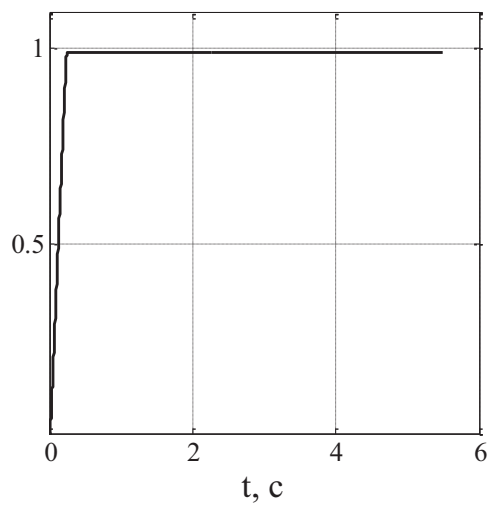
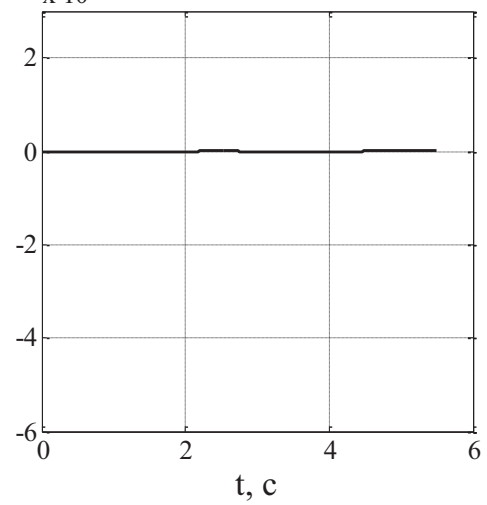
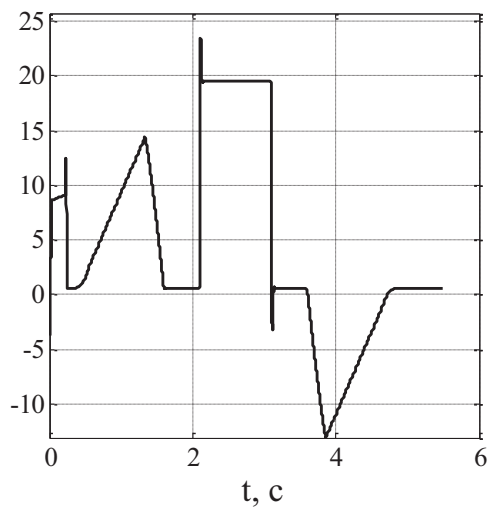
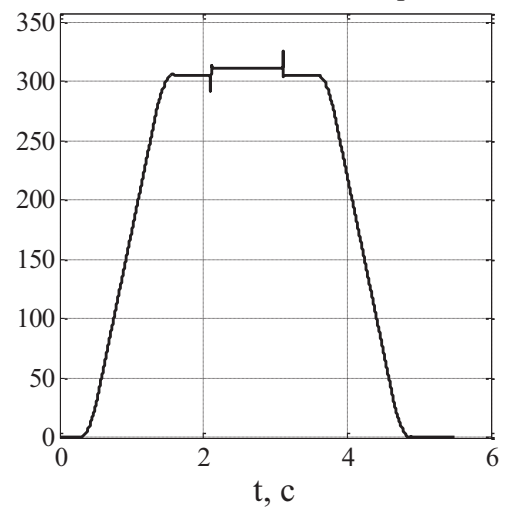
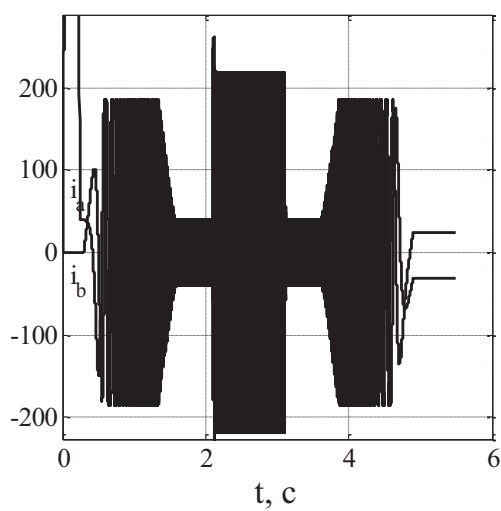
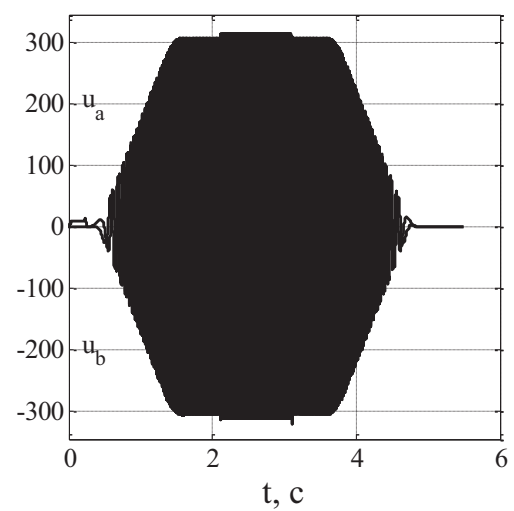


Момент навантаження M_c , НмМомент двигуна M , НмРисунок 2 – Перехідні процеси при значенні $M_c = 0.4M_n = 514.4 \text{ Нм}$

Промодельюємо роботу електромеханічної системи при значенні $M_c = 0.5M_n = 643 \text{ Нм}$.

Задана швидкість ω^* , рад/сЗадане потокозчеплення ψ^* , Вб



Потокозчеплення ψ_d , ВбПотокозчеплення ψ_q , Вб
 $\times 10^{-5}$ Напруга ротора u_d , ВНапруга ротора u_q , ВСтруми статора i_a та i_b , АНапруги статора u_a та u_b , В

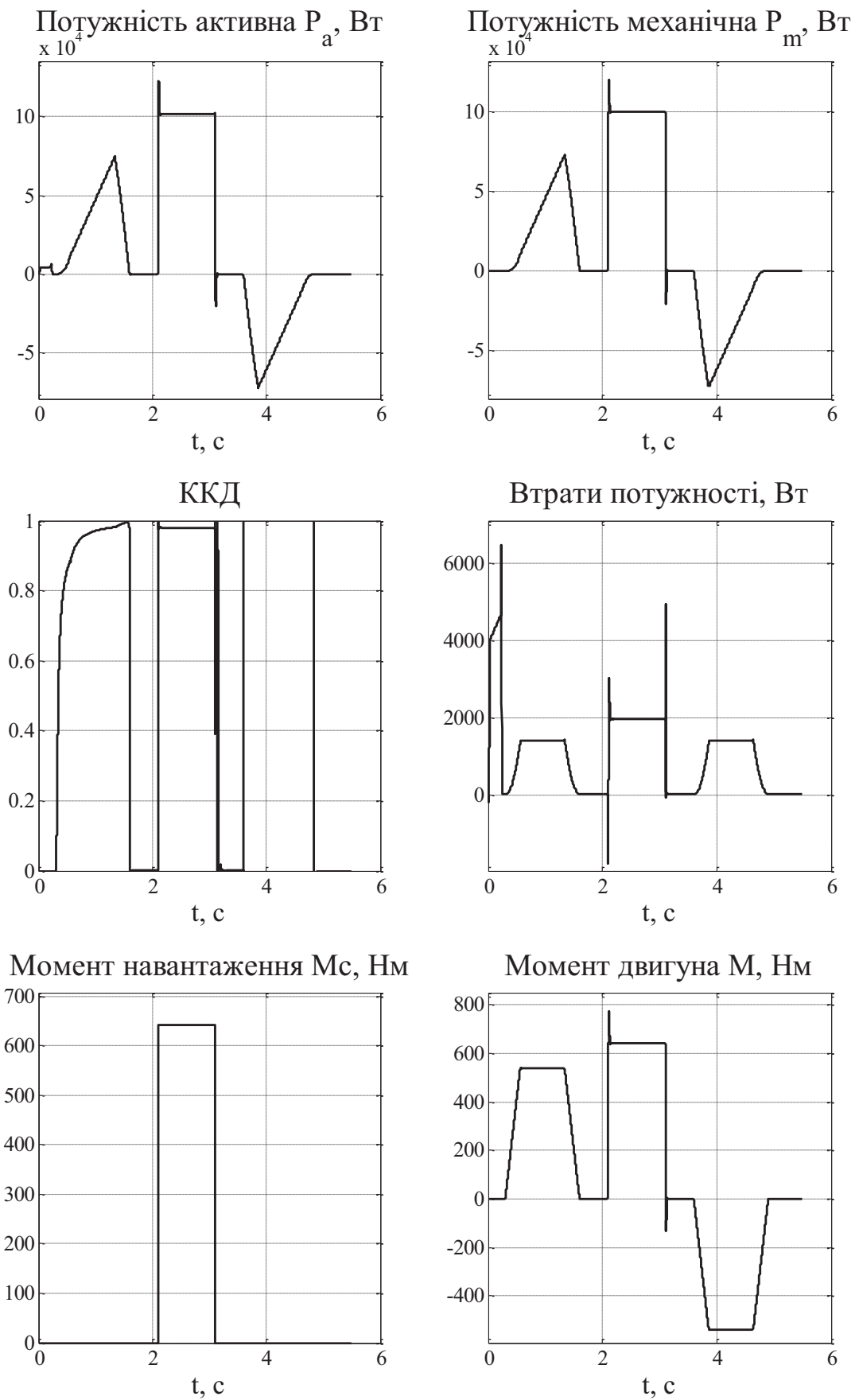
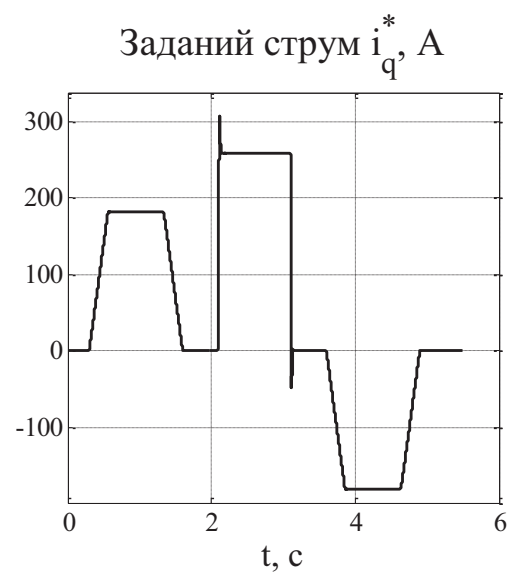
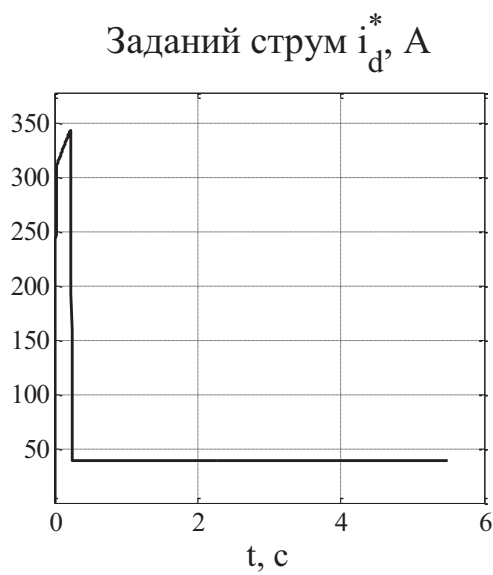
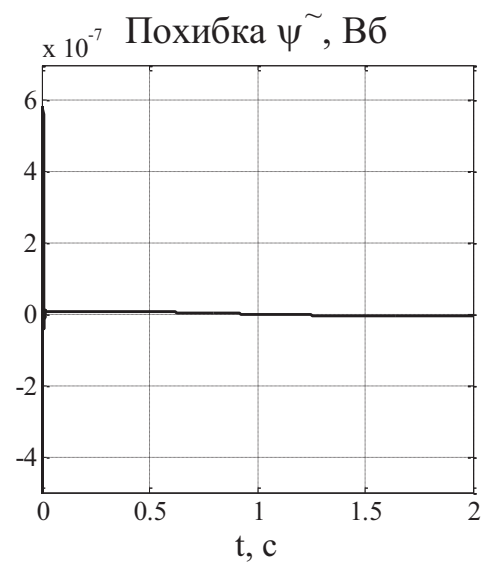
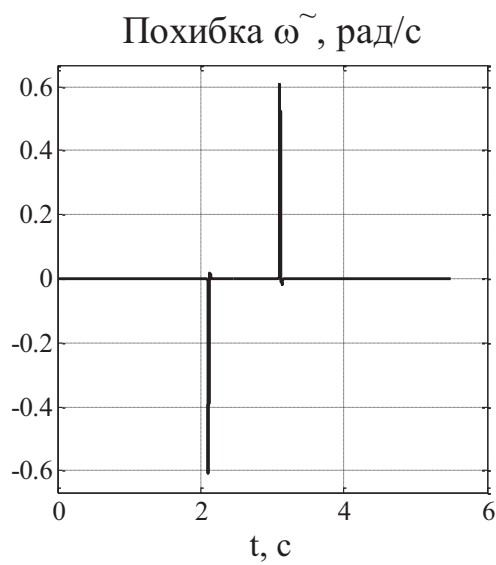
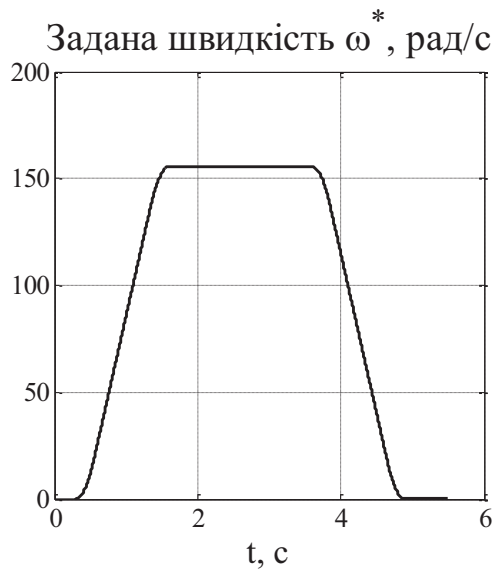
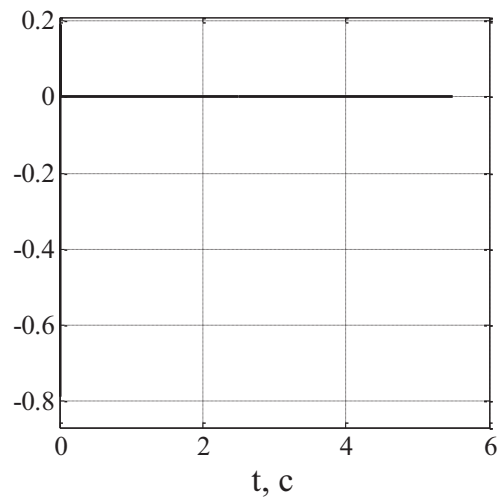
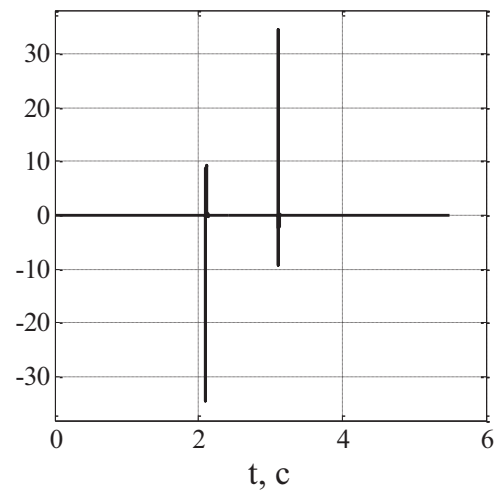
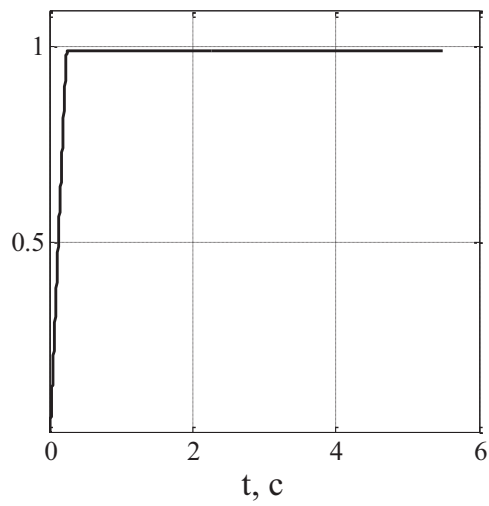
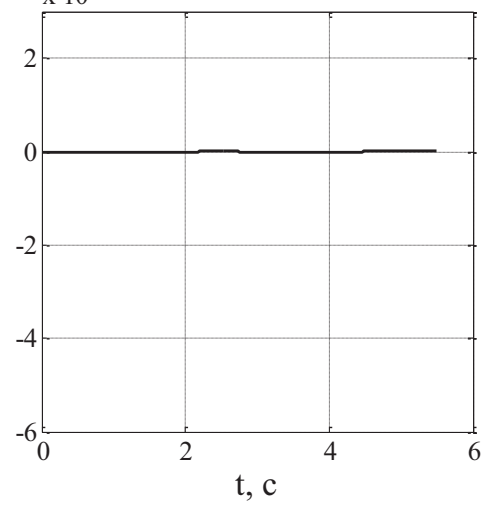
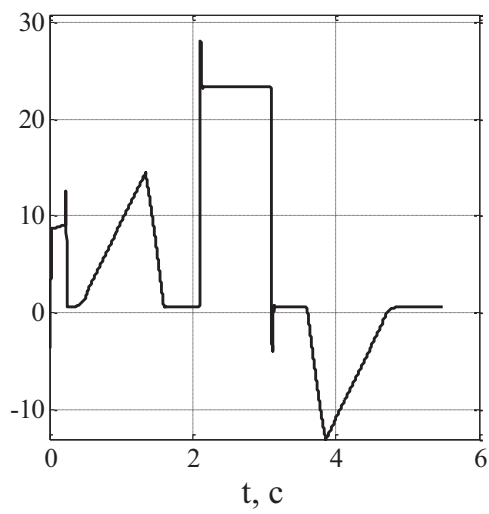
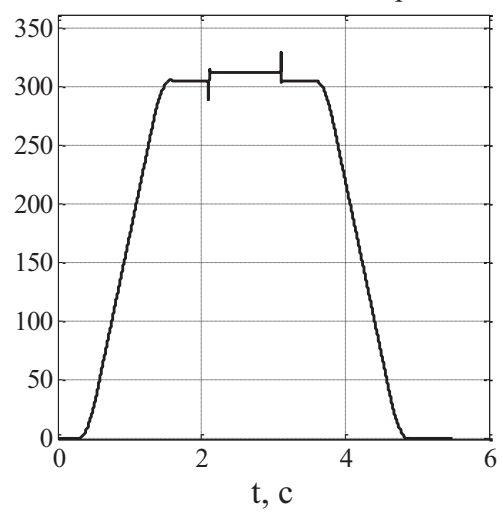
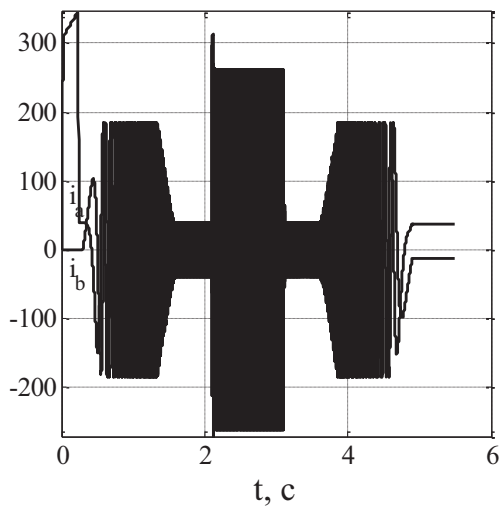
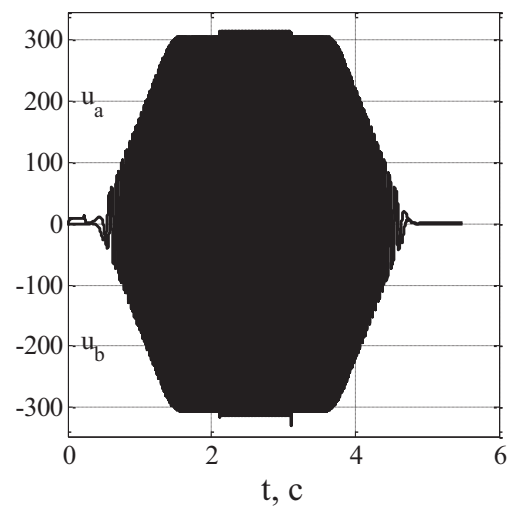
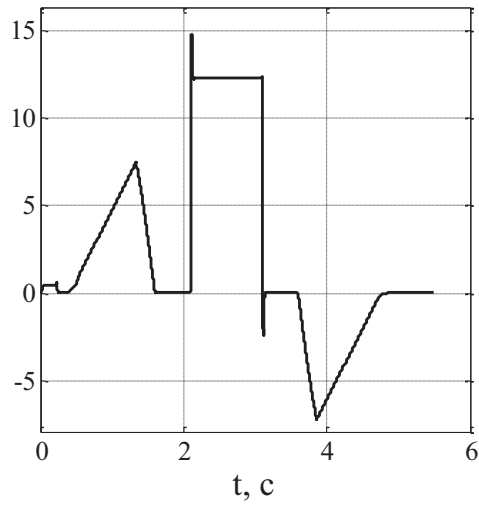
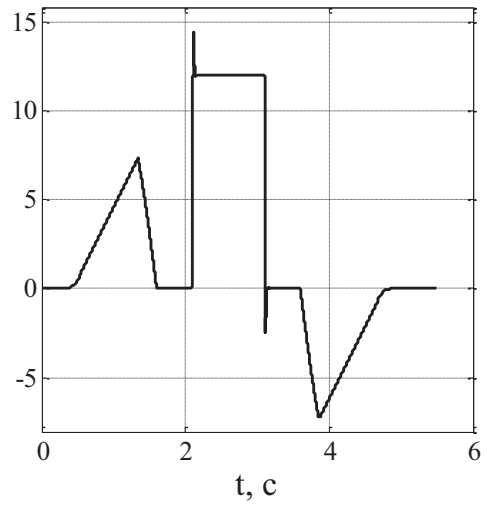


Рисунок 3– Перехідні процеси при значенні $M_c = 0.5M_n = 643 \text{ Нм}$

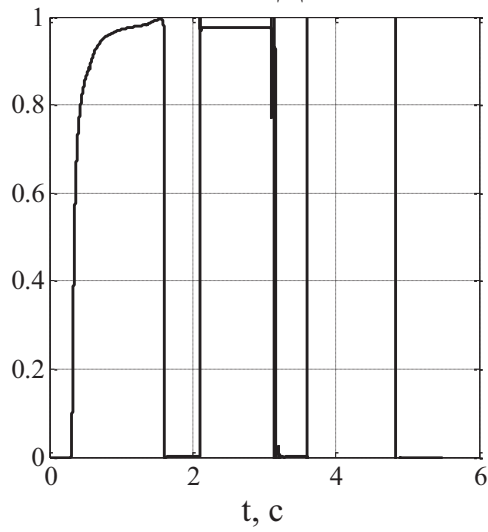
Промодельюємо роботу електромеханічної системи при значенні $M_c = 0.6M_n = 771.6 \text{ Нм}$.



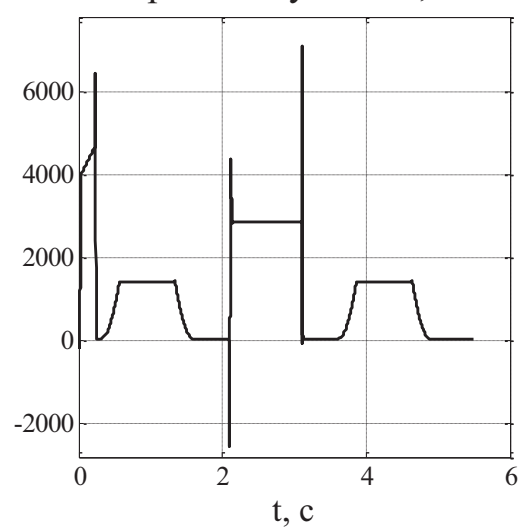
Похибка струму \tilde{i}_d , АПохибка струму \tilde{i}_q , АПотокозчеплення ψ_d , ВбПотокозчеплення ψ_q , ВбНапруга ротора u_d , ВНапруга ротора u_q , В

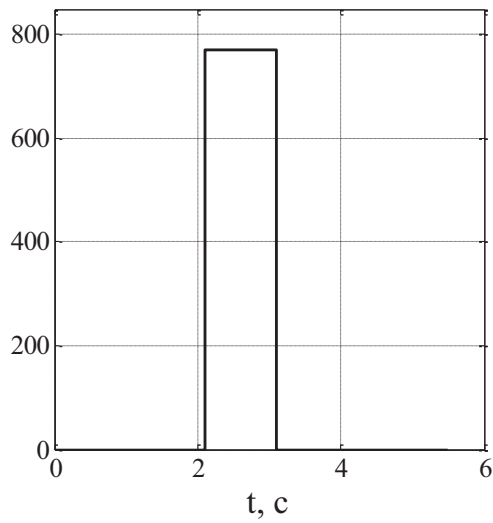
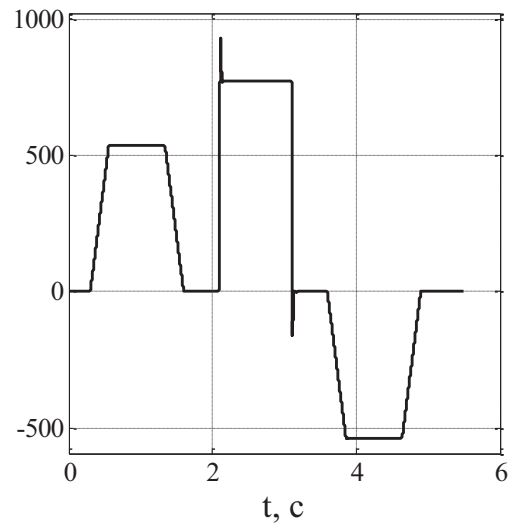
Струми статора i_a та i_b , АНапруги статора u_a та u_b , ВПотужність активна P_a , Вт
 $\times 10^4$ Потужність механічна P_m , Вт
 $\times 10^4$ 

ККД

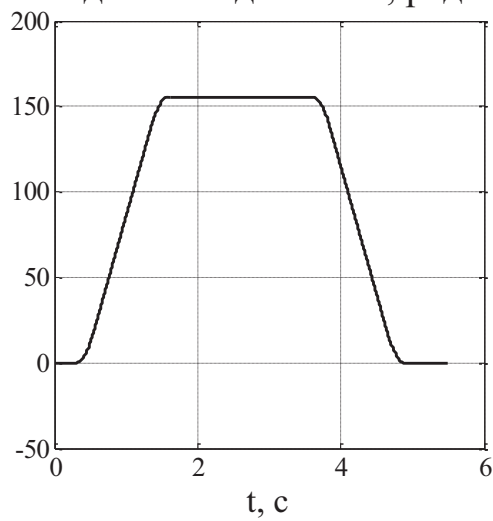
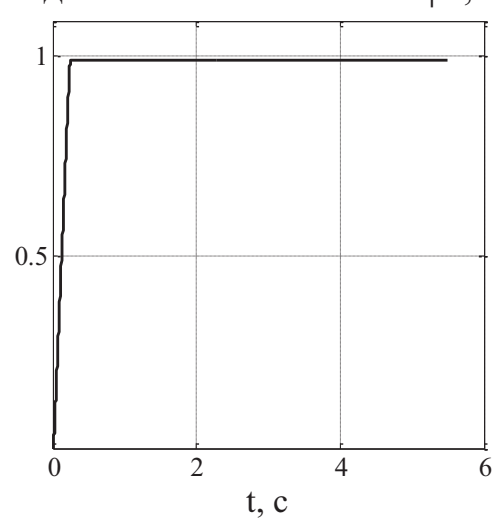


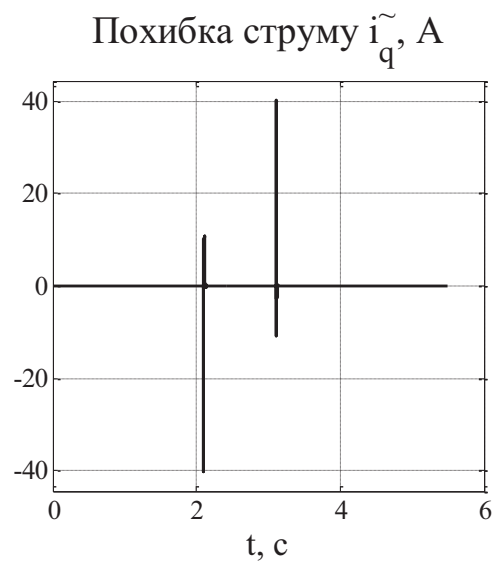
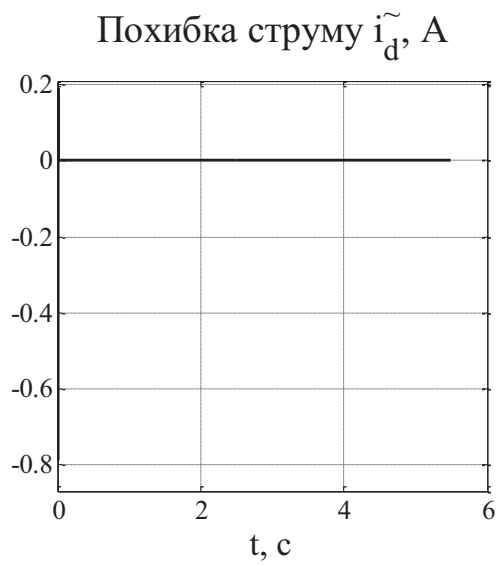
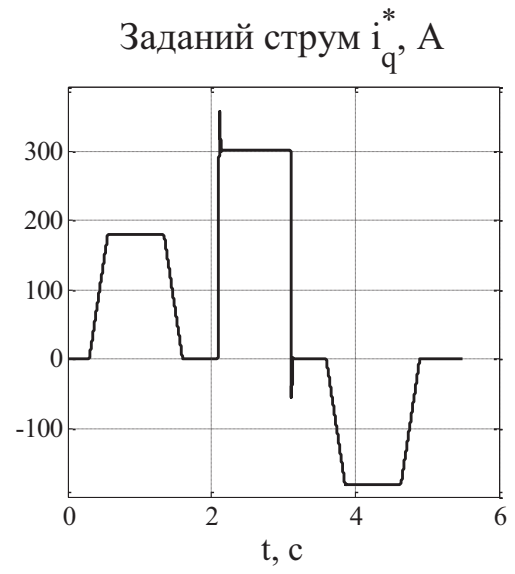
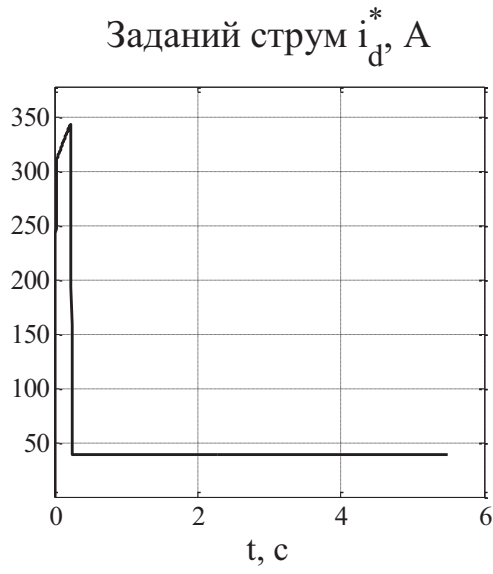
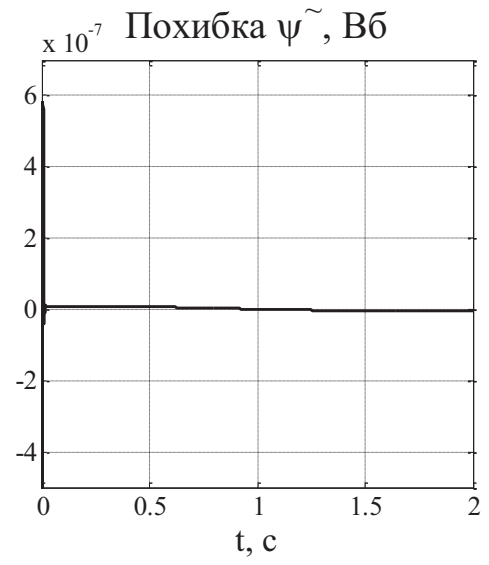
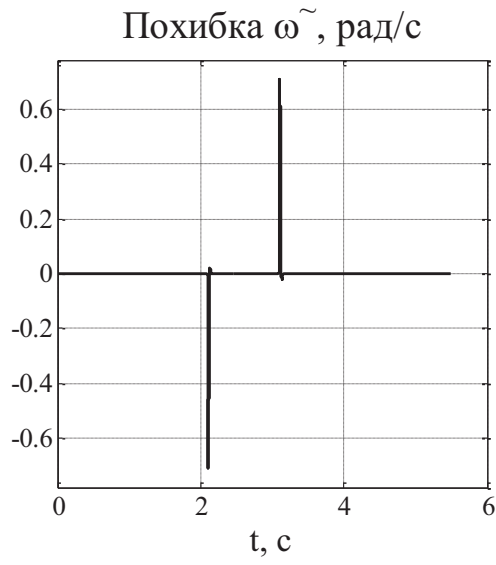
Втрати потужності, Вт

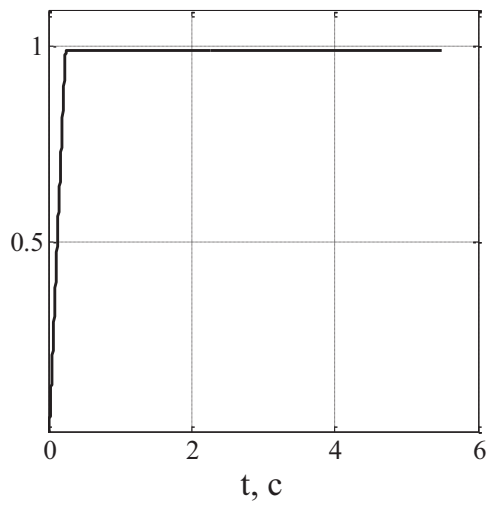
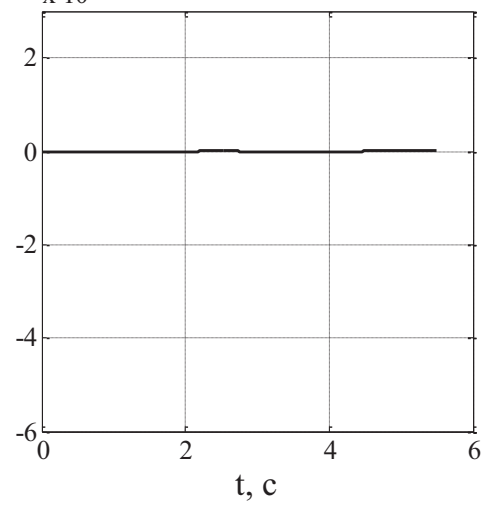
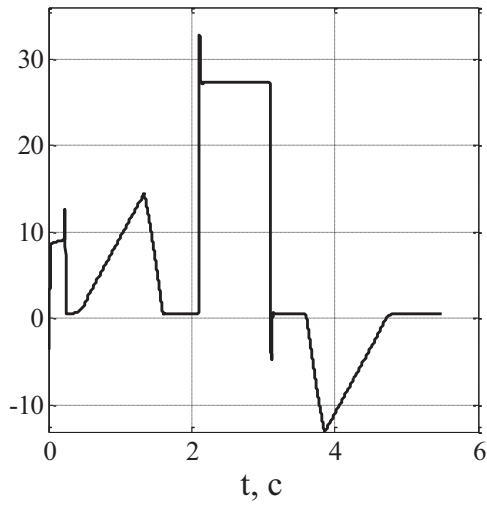
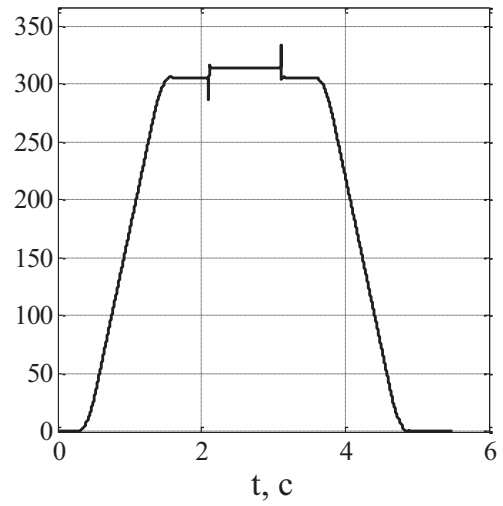
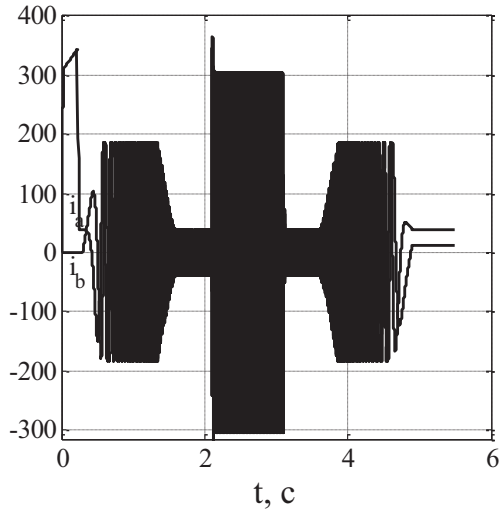
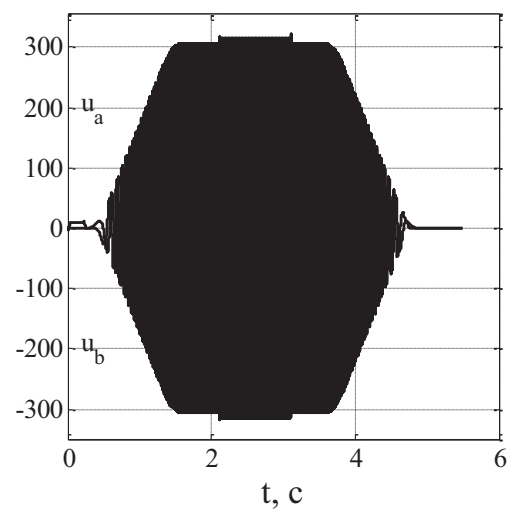


Момент навантаження M_c , НмМомент двигуна M , НмРисунок 4— Перехідні процеси при значенні $M_c = 0.6M_n = 771.6 \text{ Нм}$

Промодельюємо роботу електромеханічної системи при значенні $M_c = 0.7M_n = 900.2 \text{ Нм}$.

Задана швидкість ω^* , рад/сЗадане потокозчеплення ψ^* , Вб



Потокозчеплення ψ_d , ВбПотокозчеплення ψ_q , ВбНапруга ротора u_d , ВНапруга ротора u_q , ВСтруми статора i_a та i_b , АНапруги статора u_a та u_b , В

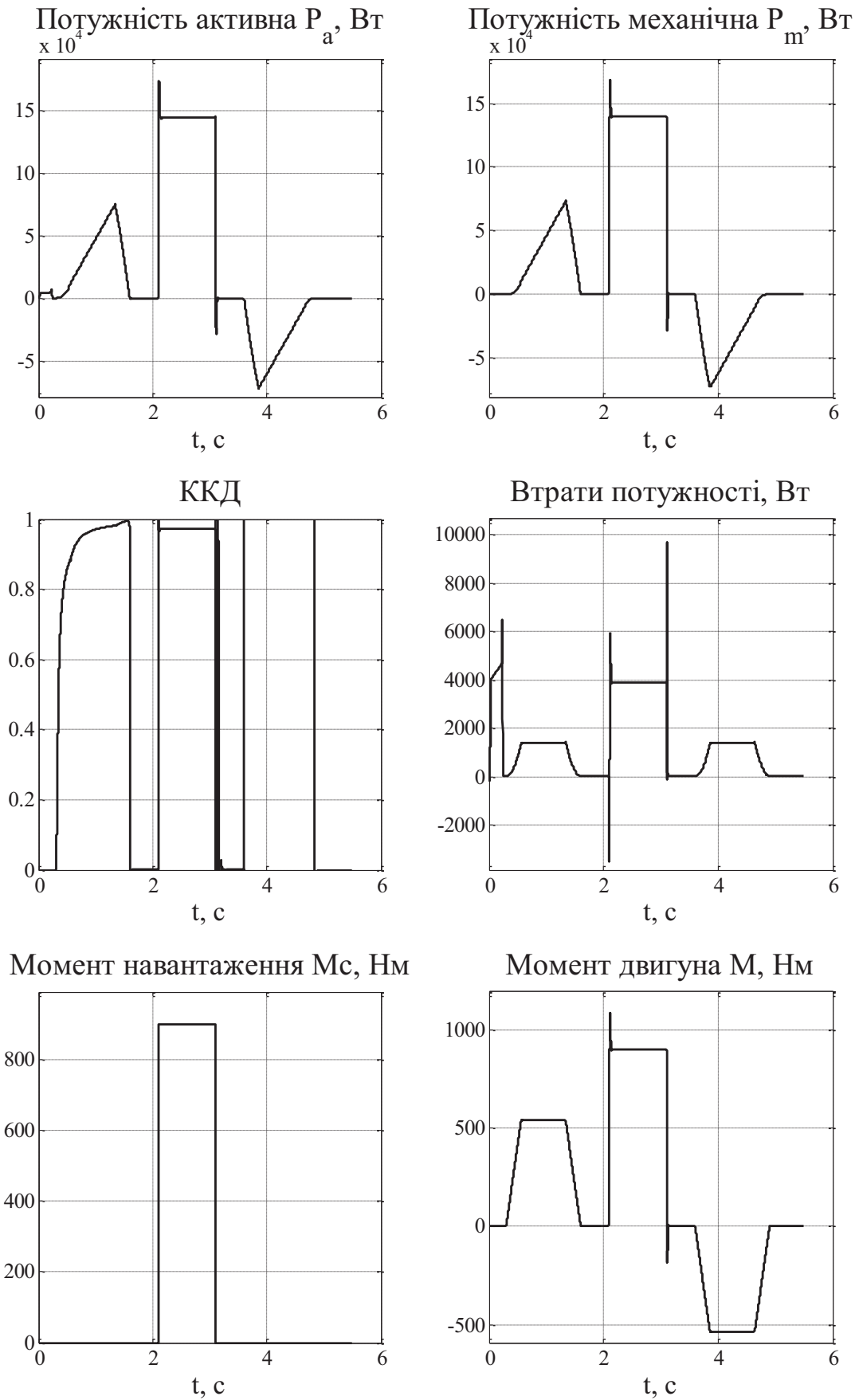
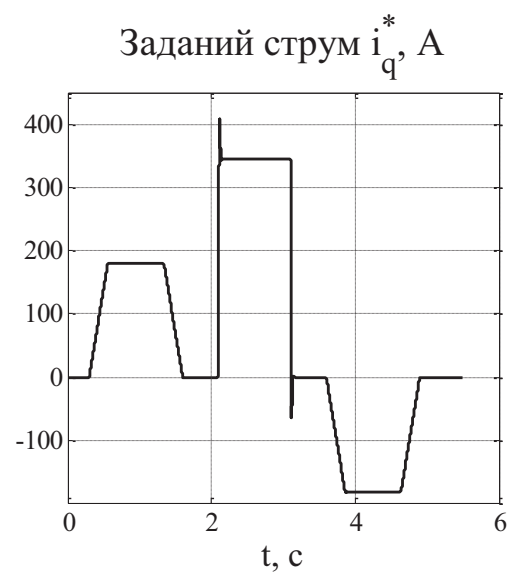
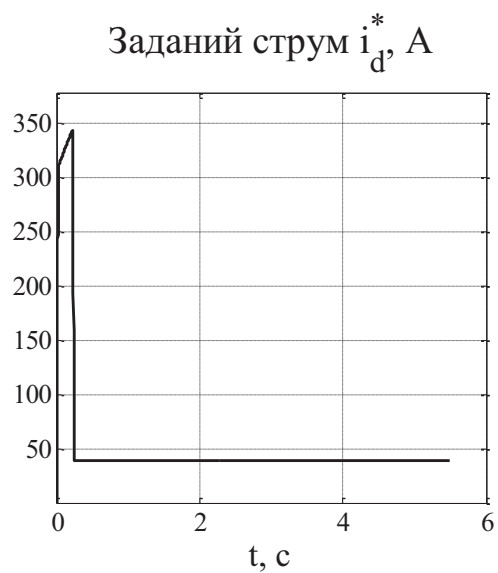
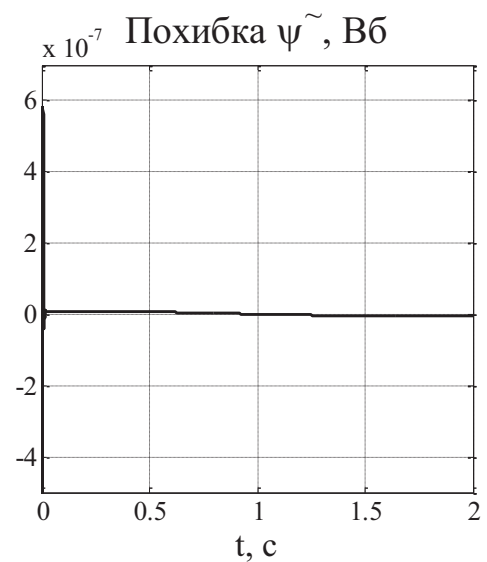
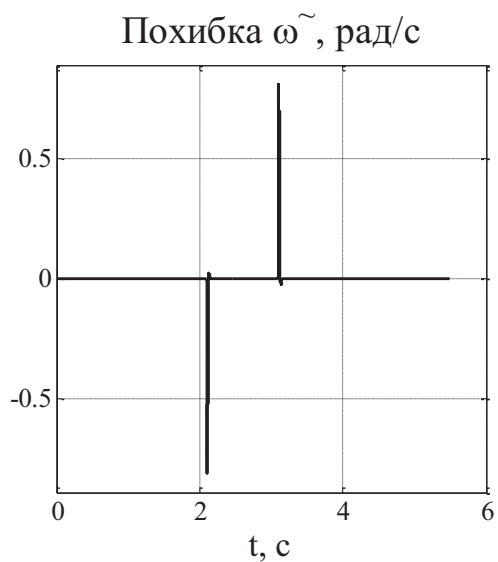
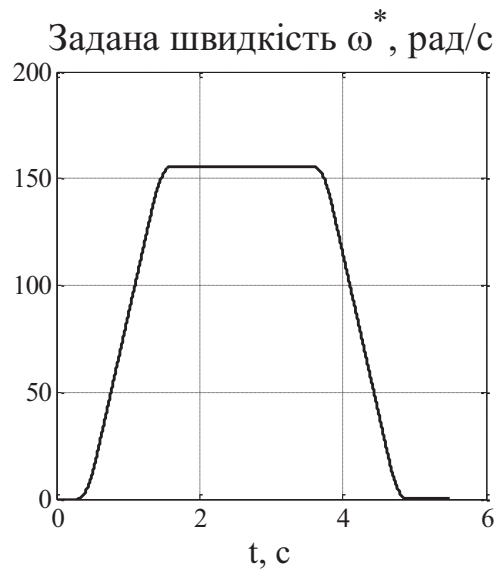
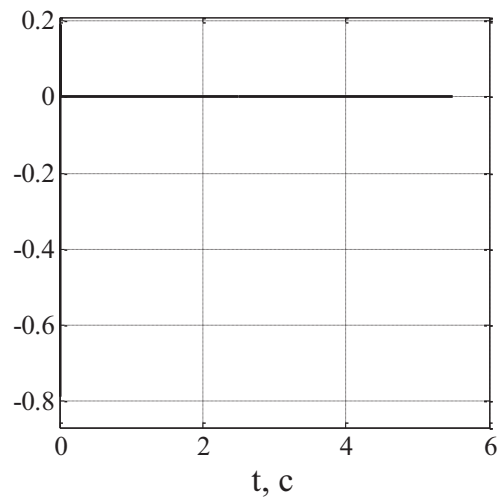
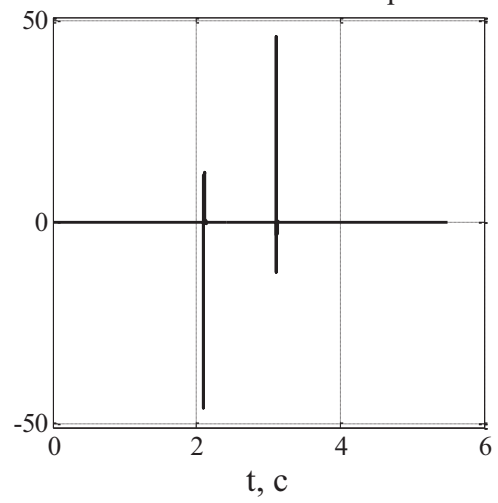
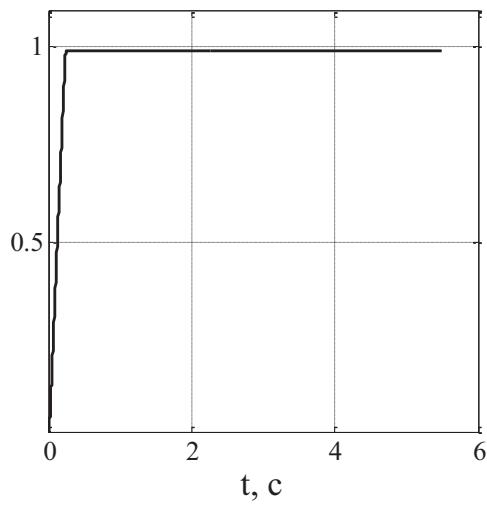
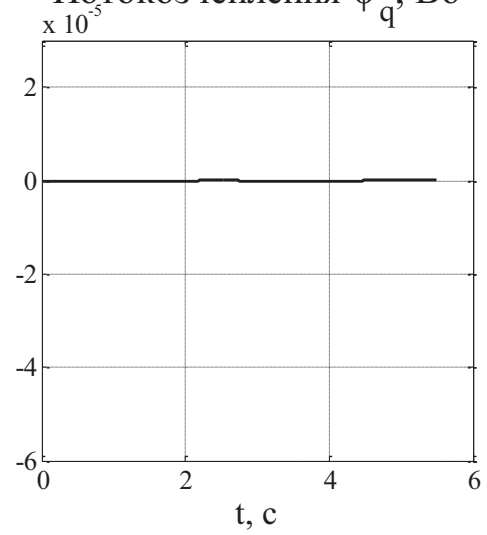
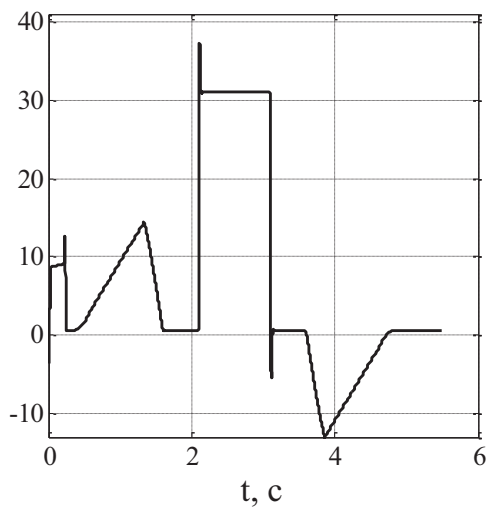
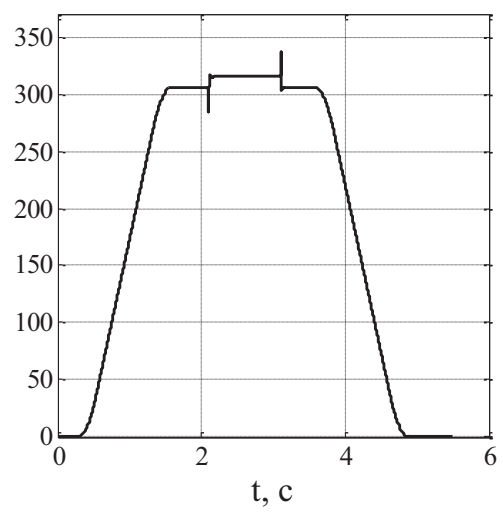


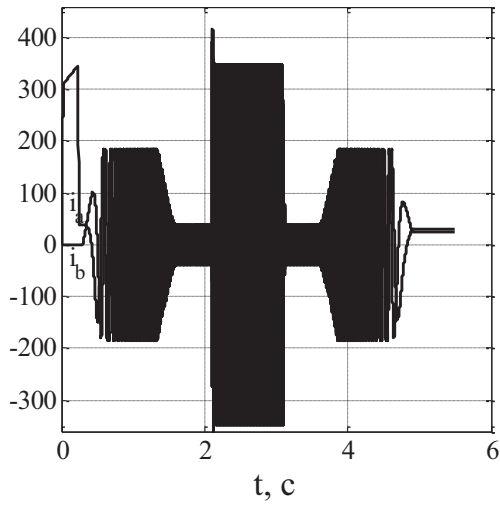
Рисунок 5— Перехідні процеси при значенні $M_c = 0.7 M_n = 900.2 \text{ Нм}$

Промодельюємо роботу електромеханічної системи при значенні $M_c = 0.8M_n = 1028.8 \text{ Нм}$.

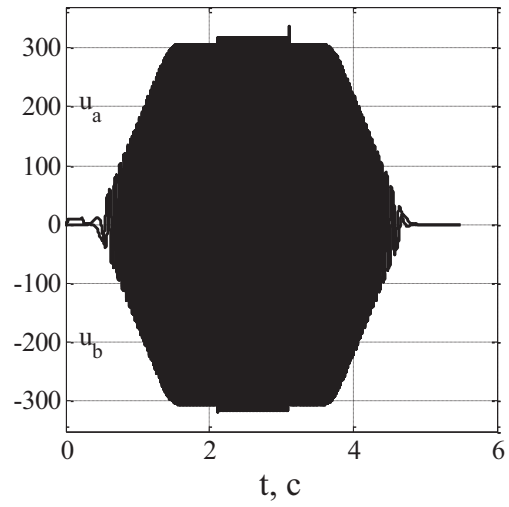


Похибка струму \tilde{i}_d , АПохибка струму \tilde{i}_q , АПотокозчеплення ψ_d , ВбПотокозчеплення ψ_q , ВбНапруга ротора u_d , ВНапруга ротора u_q , В

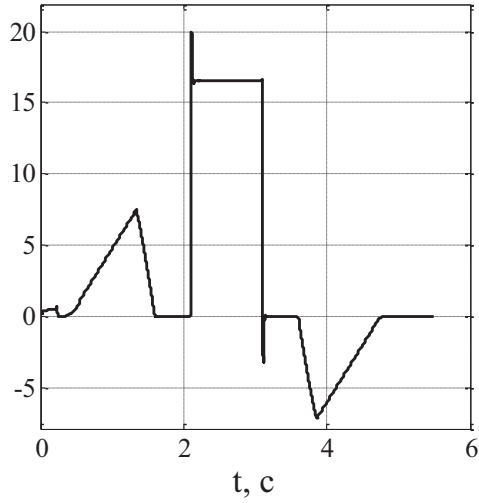
Струми статора i_a та i_b , А



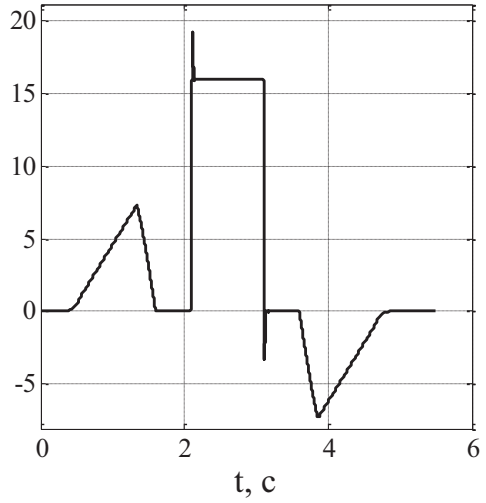
Напруги статора u_a та u_b , В



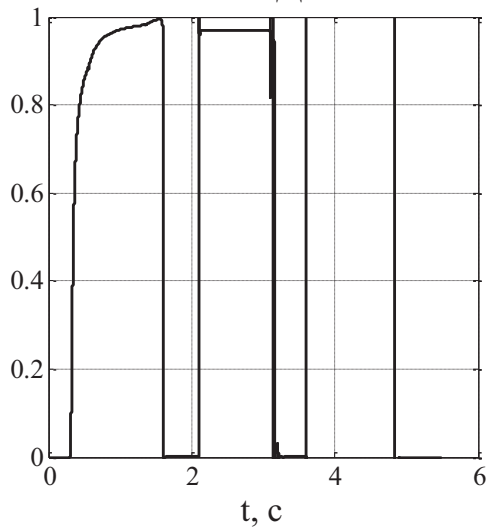
Потужність активна P_a , Вт $\times 10^4$



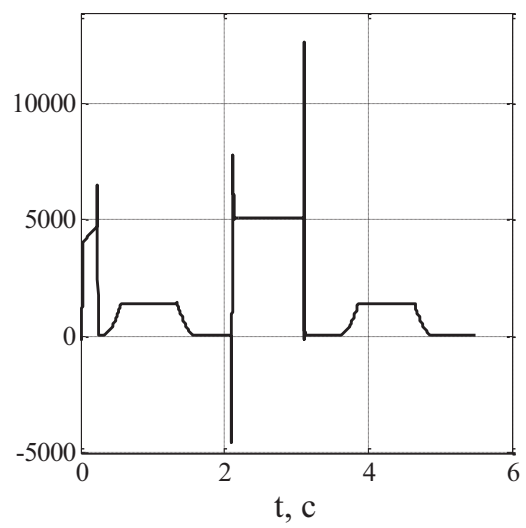
Потужність механічна P_m , Вт $\times 10^4$



ККД



Втрати потужності, Вт



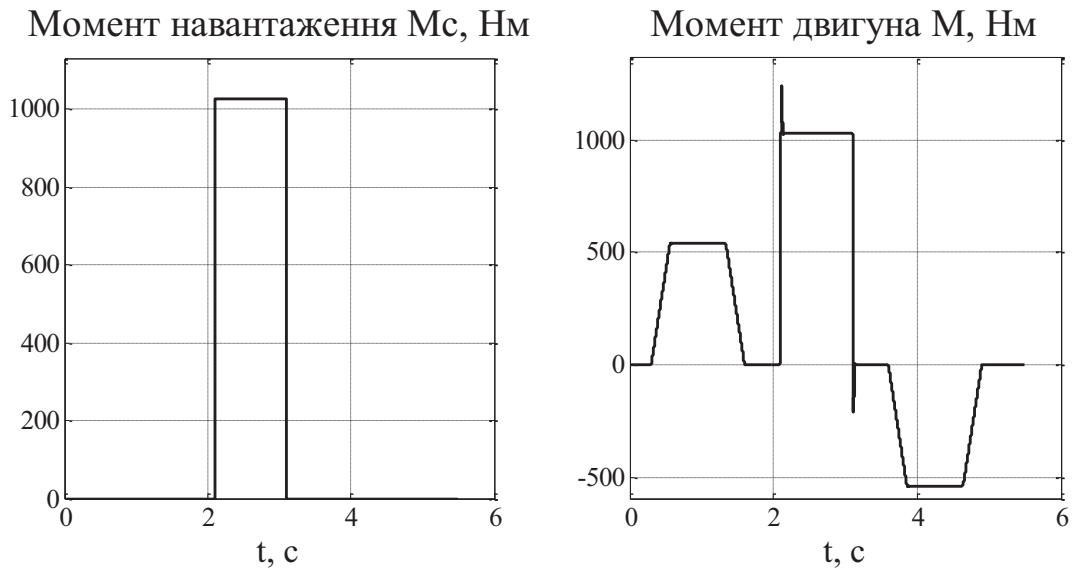
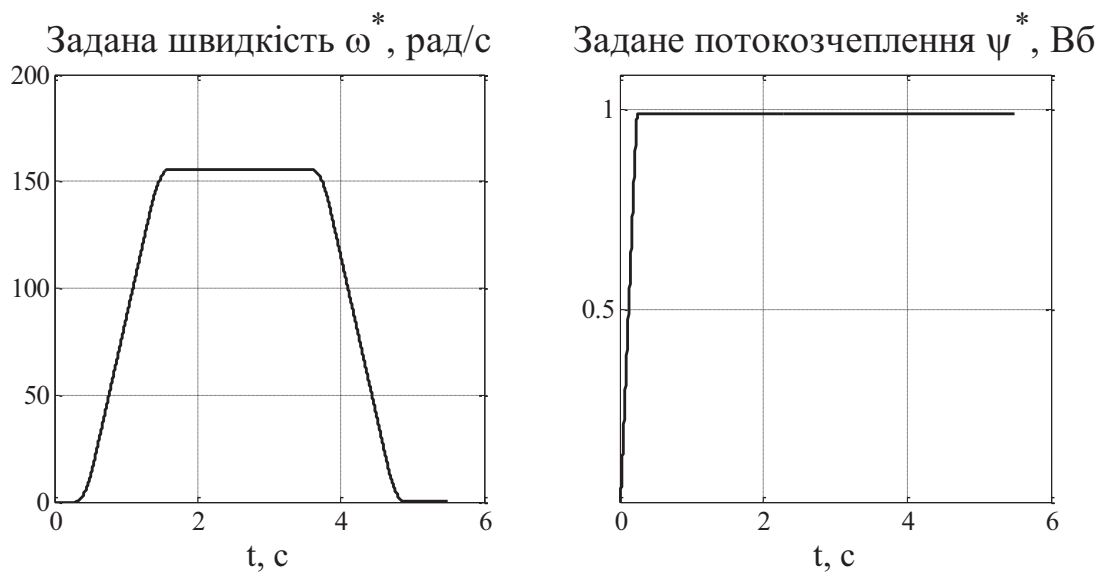
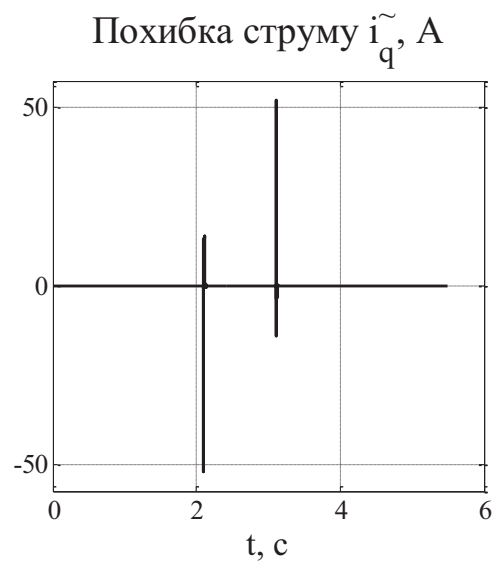
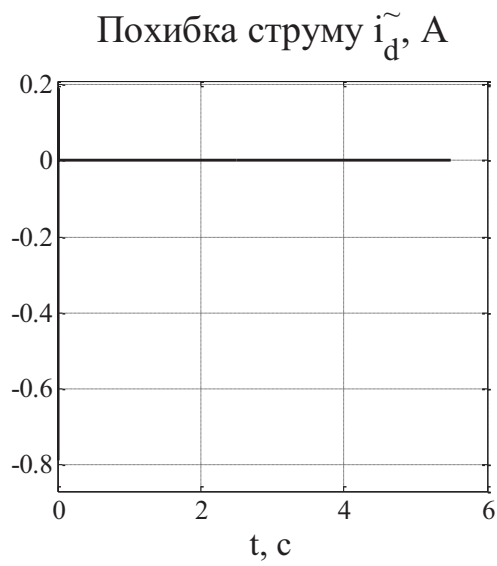
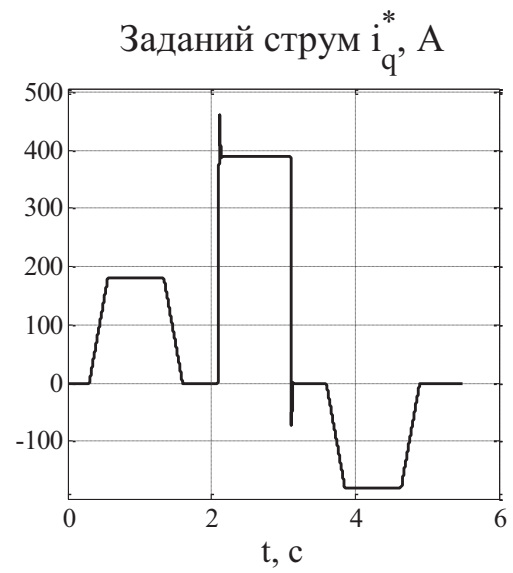
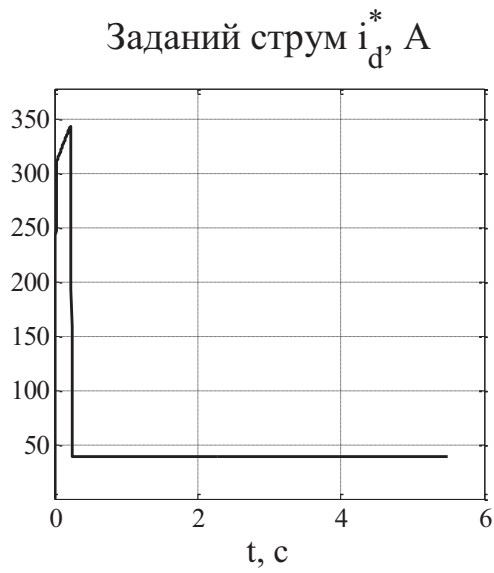
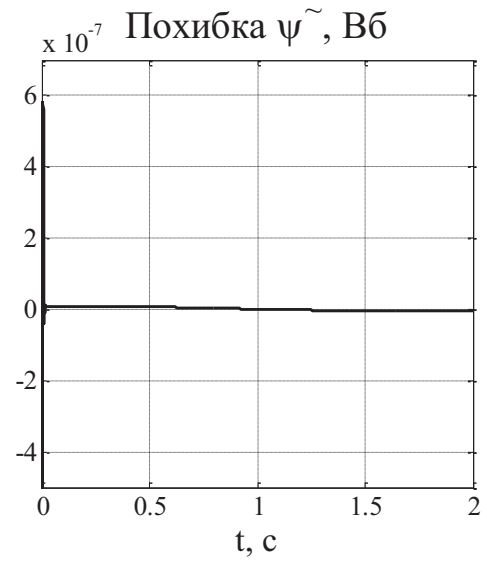
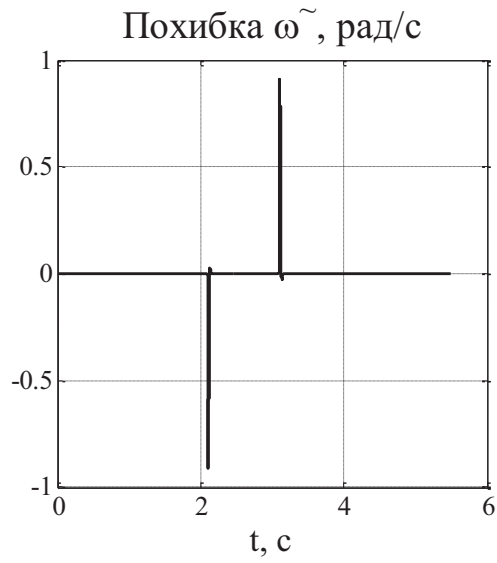
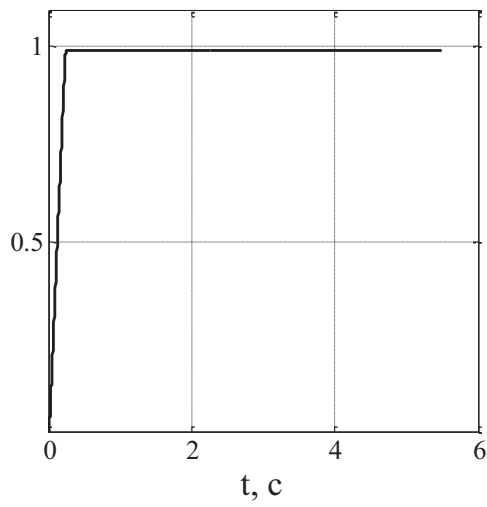
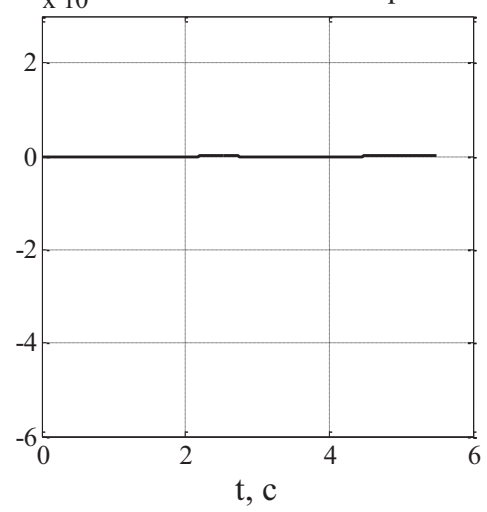
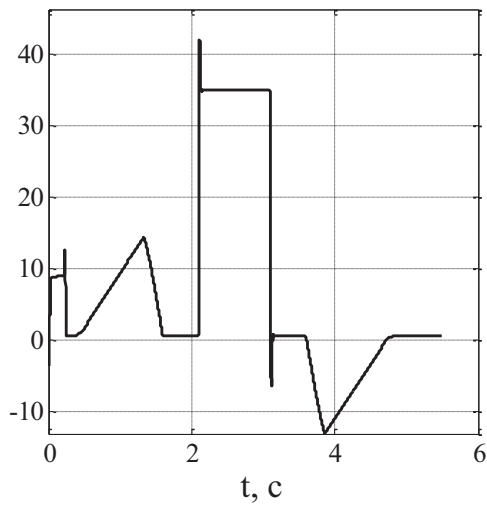
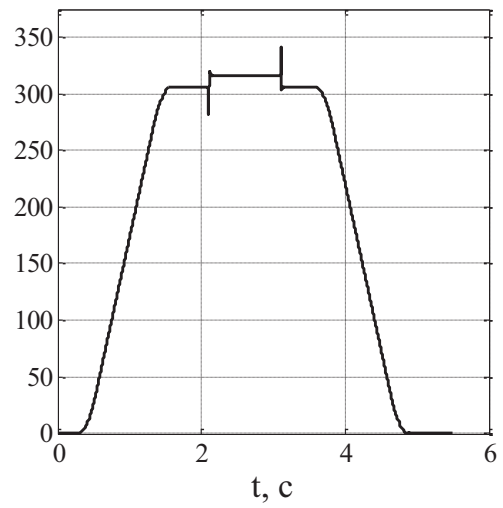
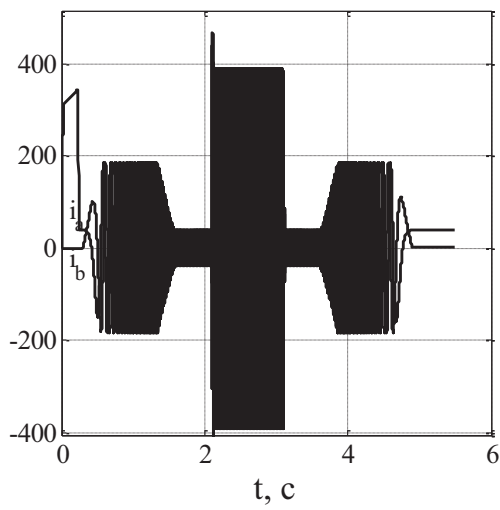
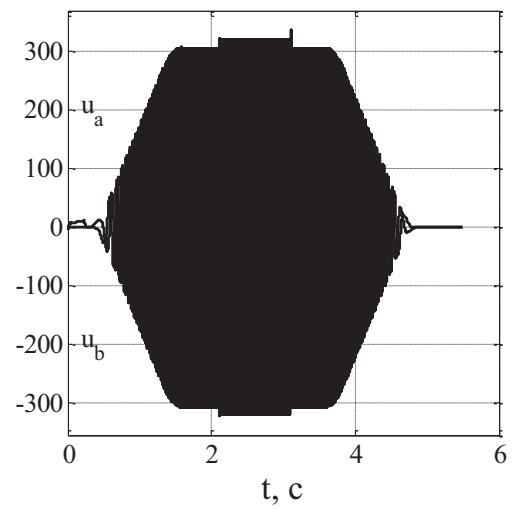


Рисунок 6 – Перехідні процеси при значенні $M_c = 0.8M_n = 1028.8 \text{ Нм}$

Промодельюємо роботу електромеханічної системи при значенні $M_c = 0.9M_n = 1157.4 \text{ Нм}$.





Потокозчеплення ψ_d , ВбПотокозчеплення ψ_q , ВбНапруга ротора u_d , ВНапруга ротора u_q , ВСтруми статора i_a та i_b , АНапруги статора u_a та u_b , В

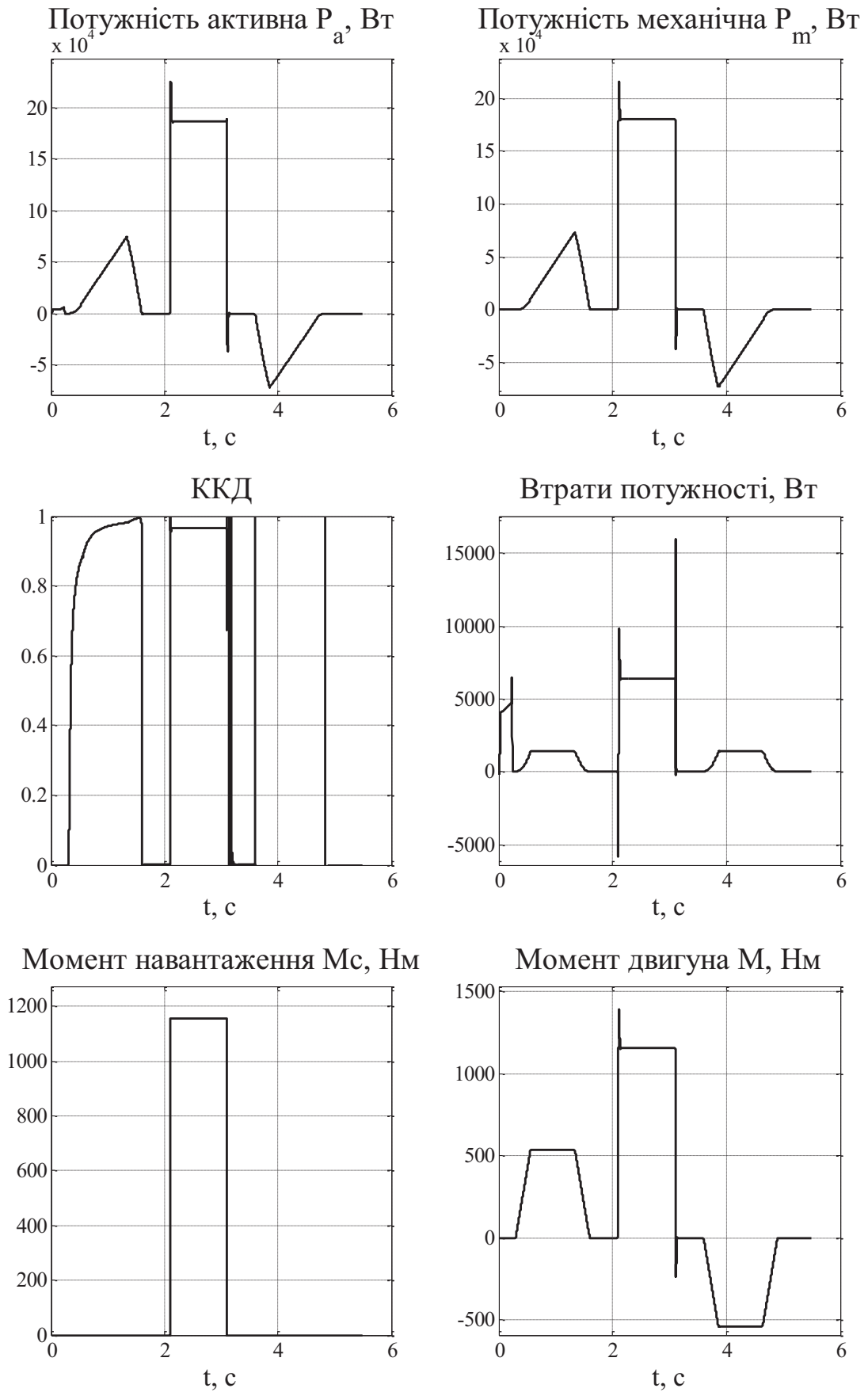
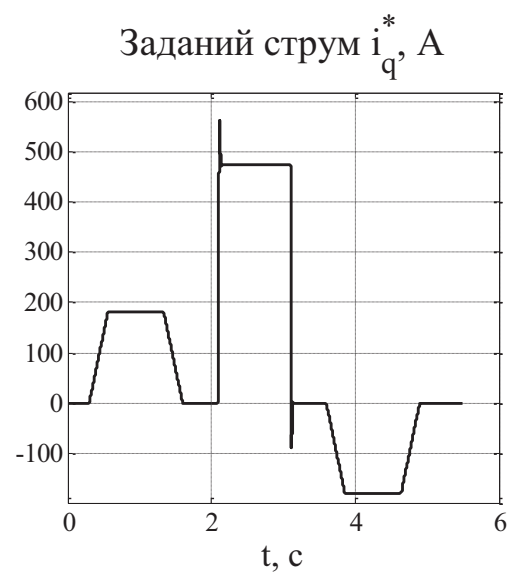
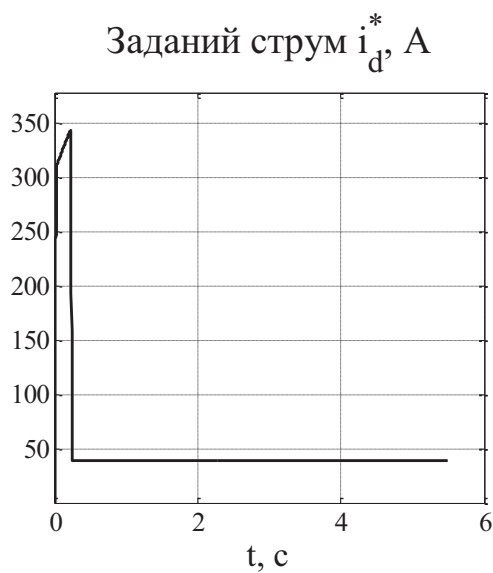
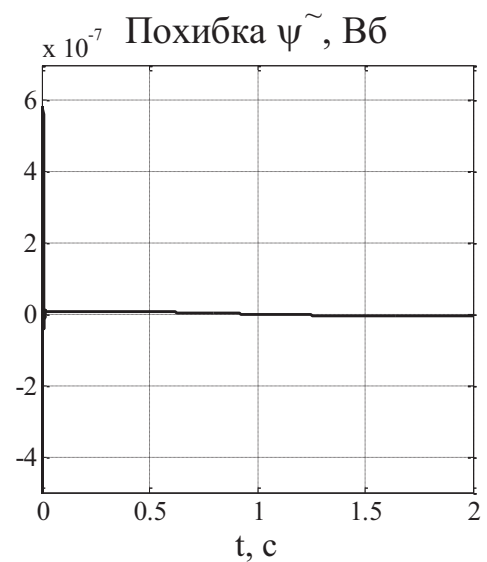
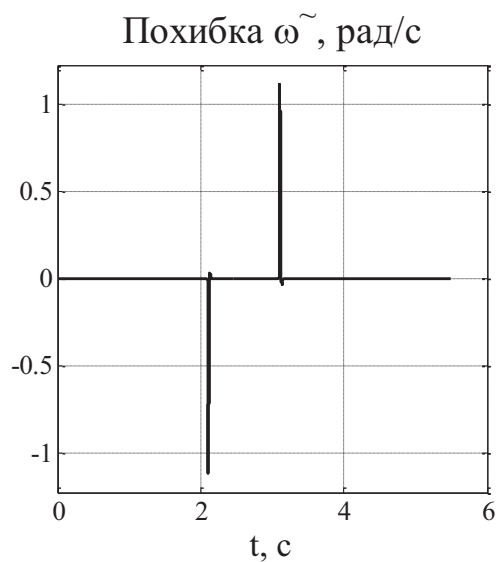
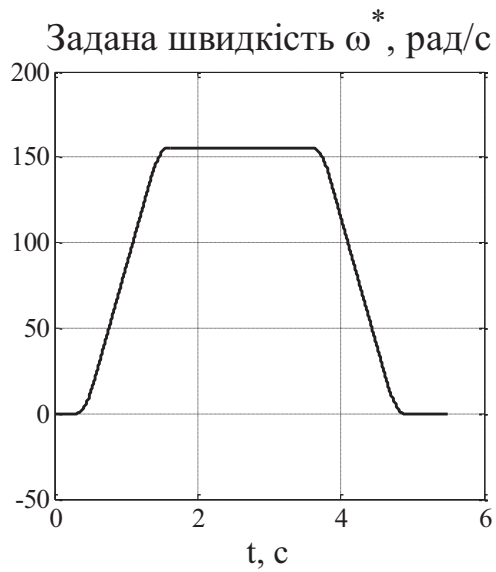
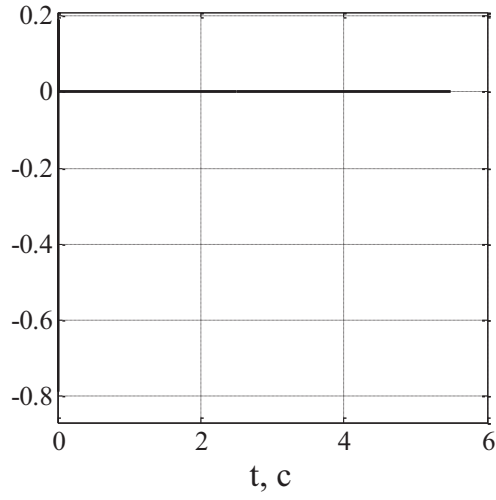


Рисунок 7 – Перехідні процеси при значенні $M_c = 0.9M_n = 1157.4 \text{ Нм}$

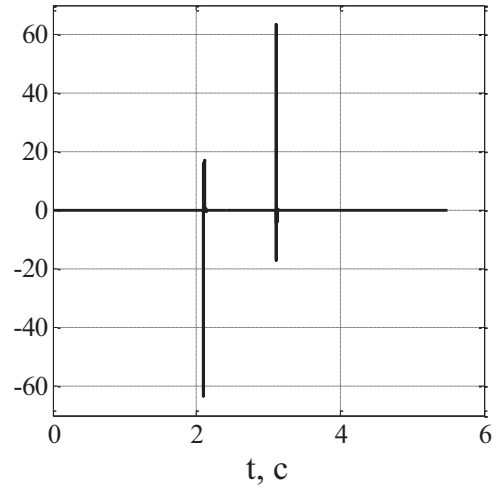
Промодельюємо роботу електромеханічної системи при значенні $M_c = 1.1M_n = 1414.6 \text{ Нм}$.



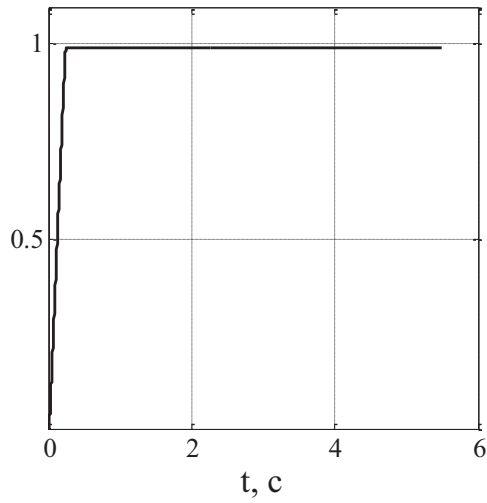
Похибка струму \tilde{i}_d , А



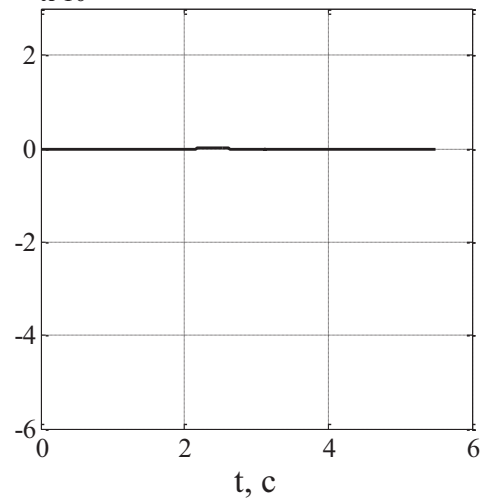
Похибка струму \tilde{i}_q , А



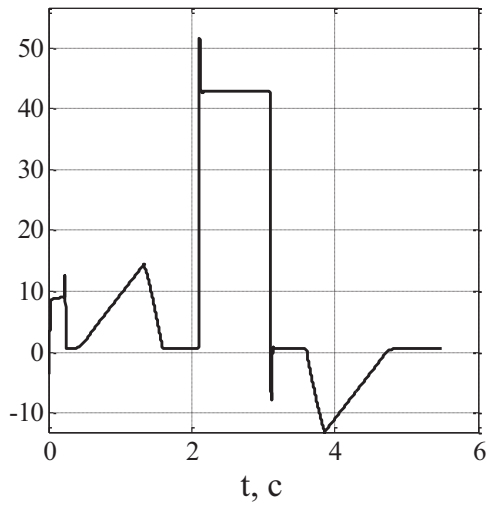
Потокозчеплення ψ_d , Вб



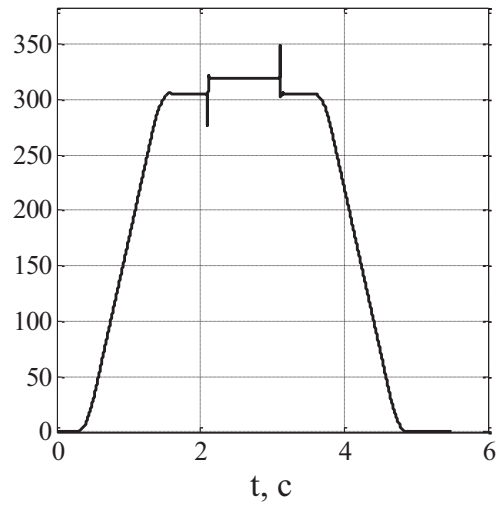
Потокозчеплення ψ_q , Вб

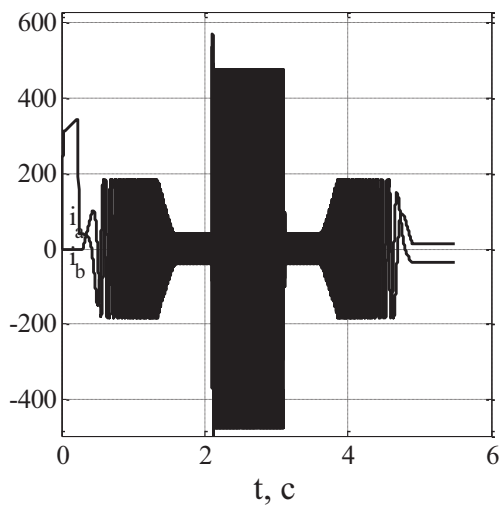
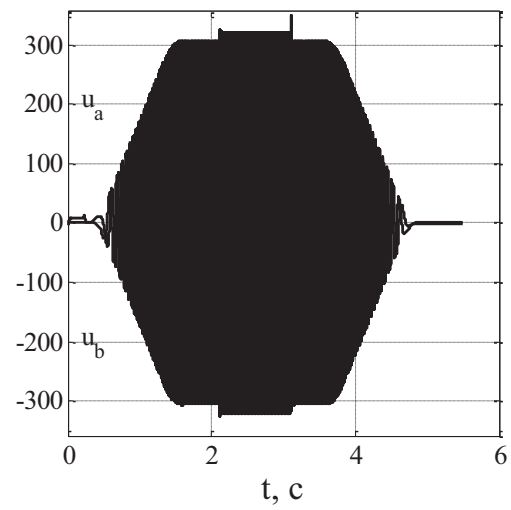
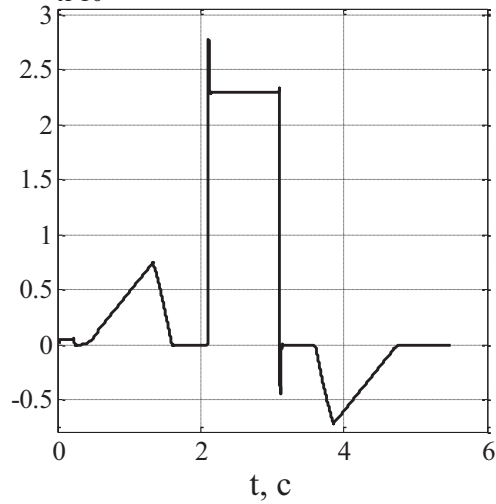
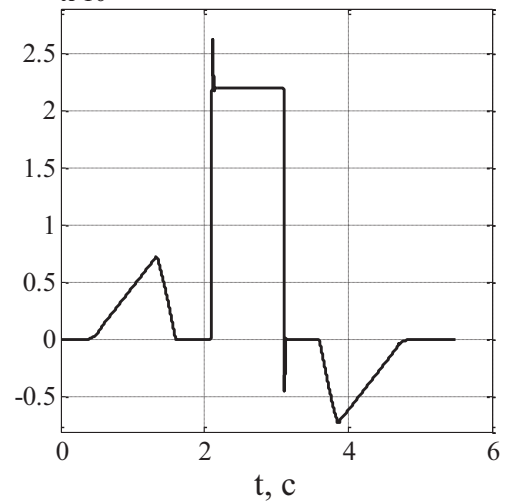


Напруга ротора u_d , В

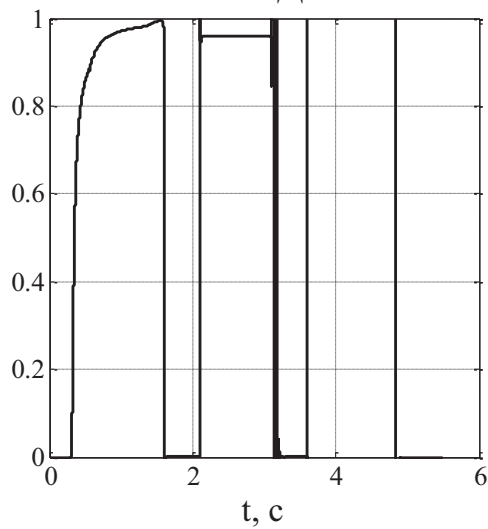


Напруга ротора u_q , В

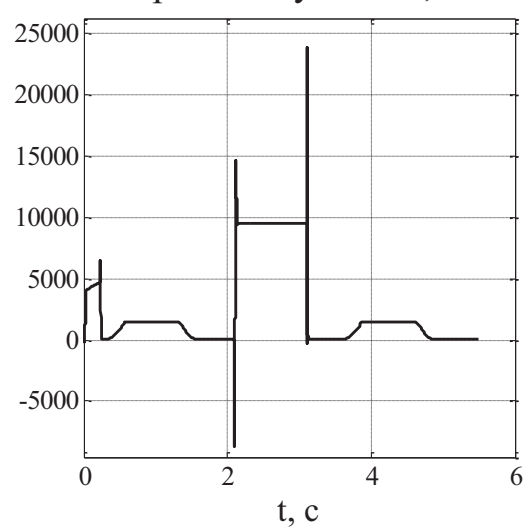


Струми статора i_a та i_b , АНапруги статора u_a та u_b , ВПотужність активна P_a , Вт
 $\times 10^5$ Потужність механічна P_m , Вт
 $\times 10^5$ 

ККД



Втрати потужності, Вт



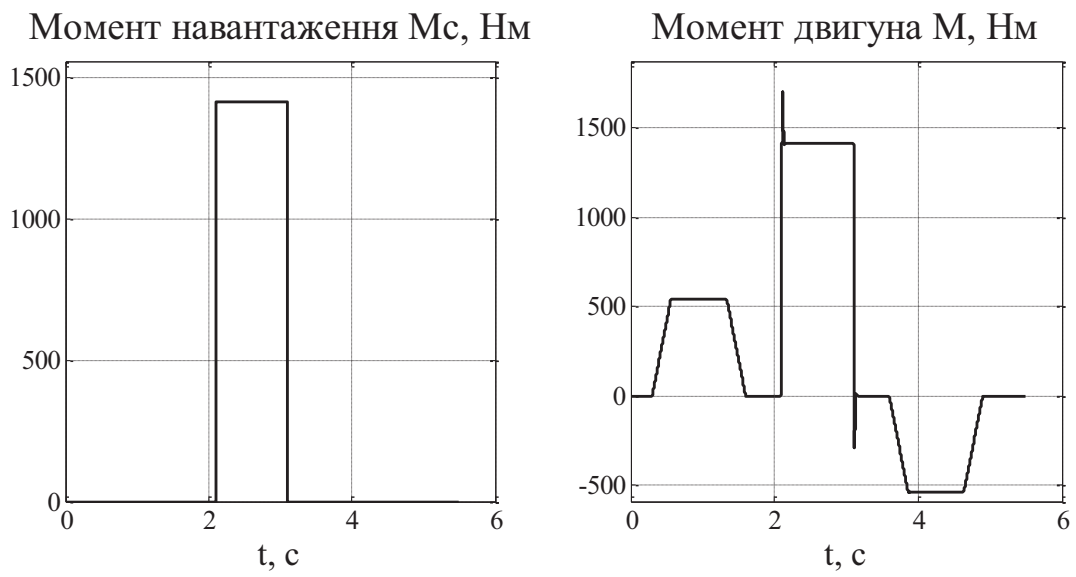
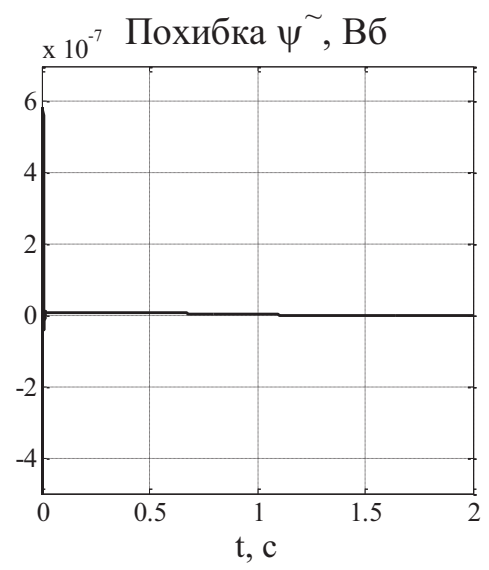
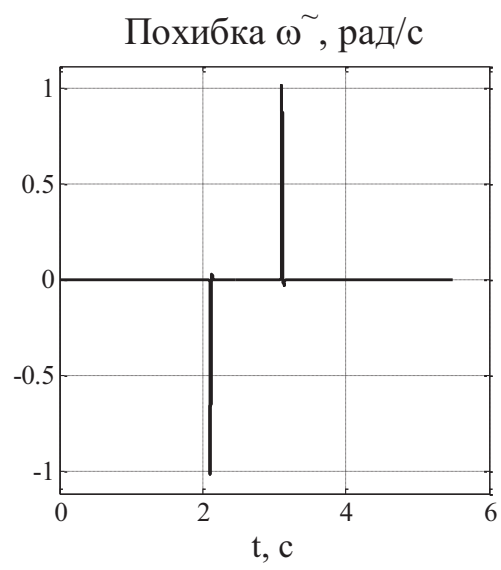
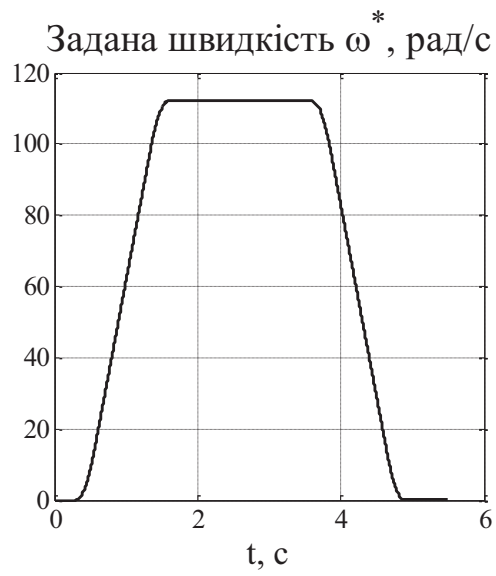
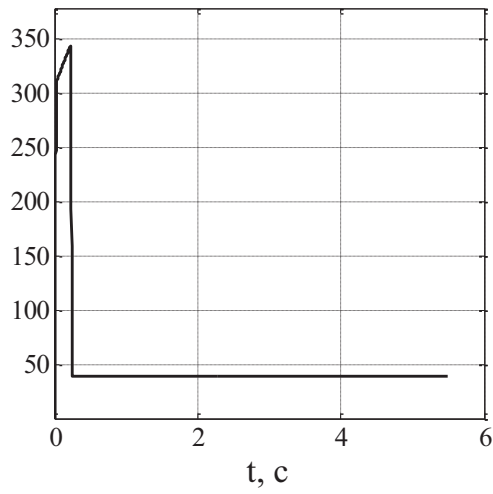
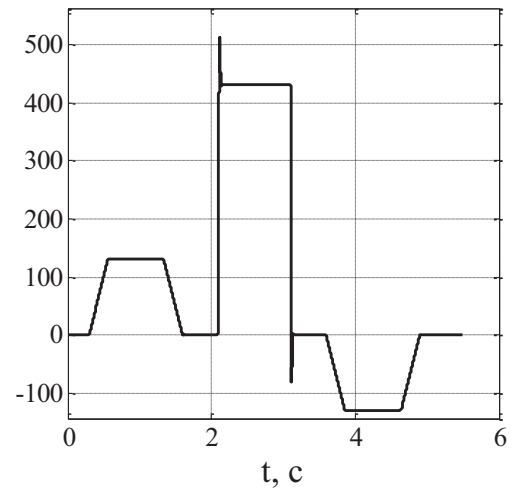
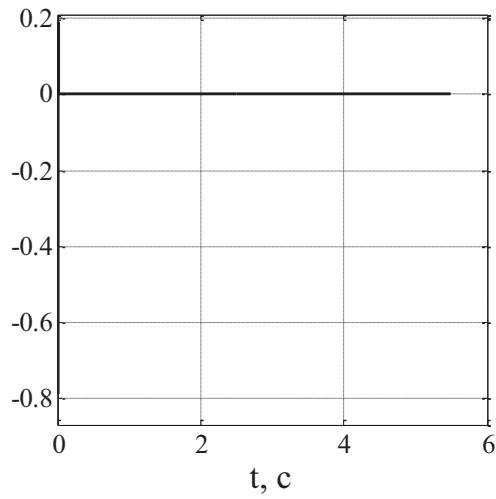
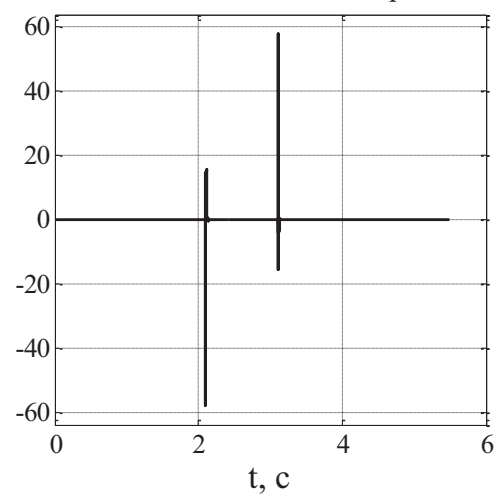
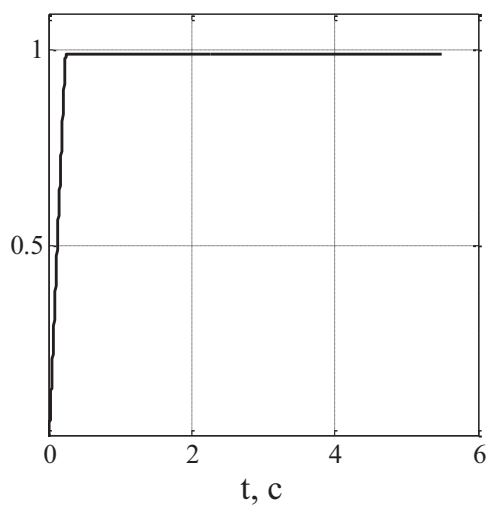
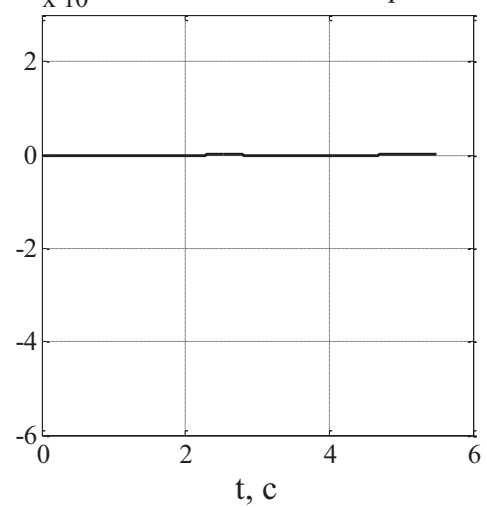
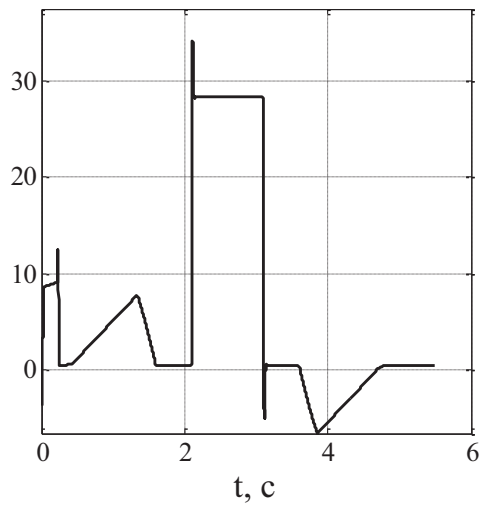
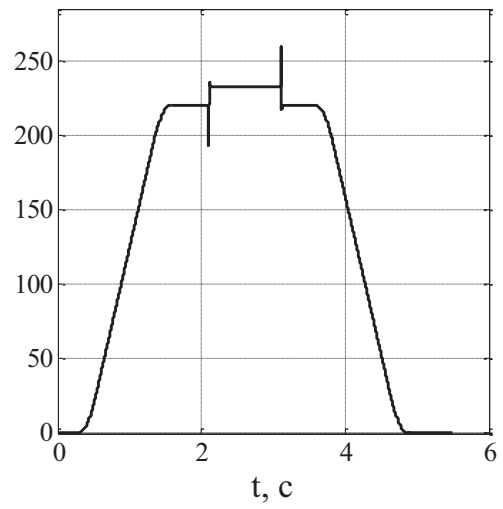
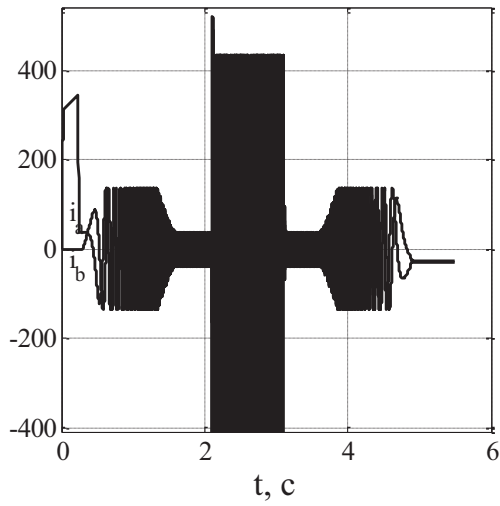
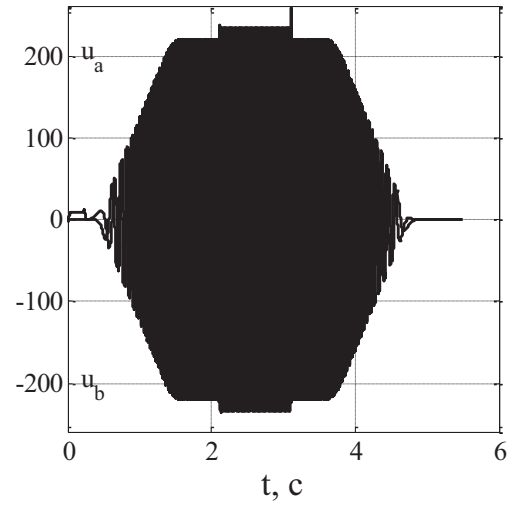
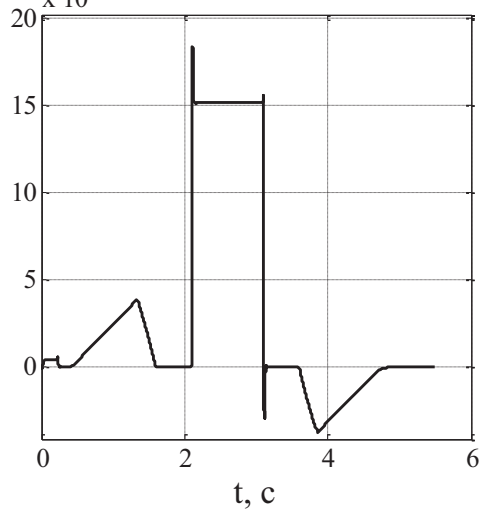
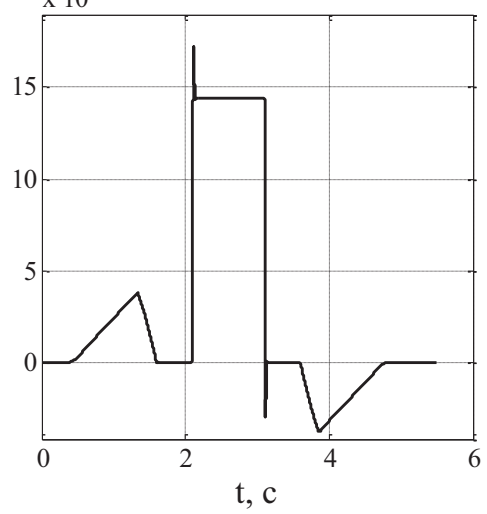


Рисунок 8 – Перехідні процеси при значенні $M_c = 1.1M_n = 1414.6 \text{ Нм}$

ДОДАТОК 2



Заданий струм i_d^* , АЗаданий струм i_q^* , АПохибка струму \tilde{i}_d , АПохибка струму \tilde{i}_q , АПотокозчеплення ψ_d , ВбПотокозчеплення ψ_q , Вб

Напряга ротора u_d , ВНапряга ротора u_q , ВСтруми статора i_a та i_b , АНапряги статора u_a та u_b , ВПотужність активна P_a , ВтПотужність механічна P_m , Вт

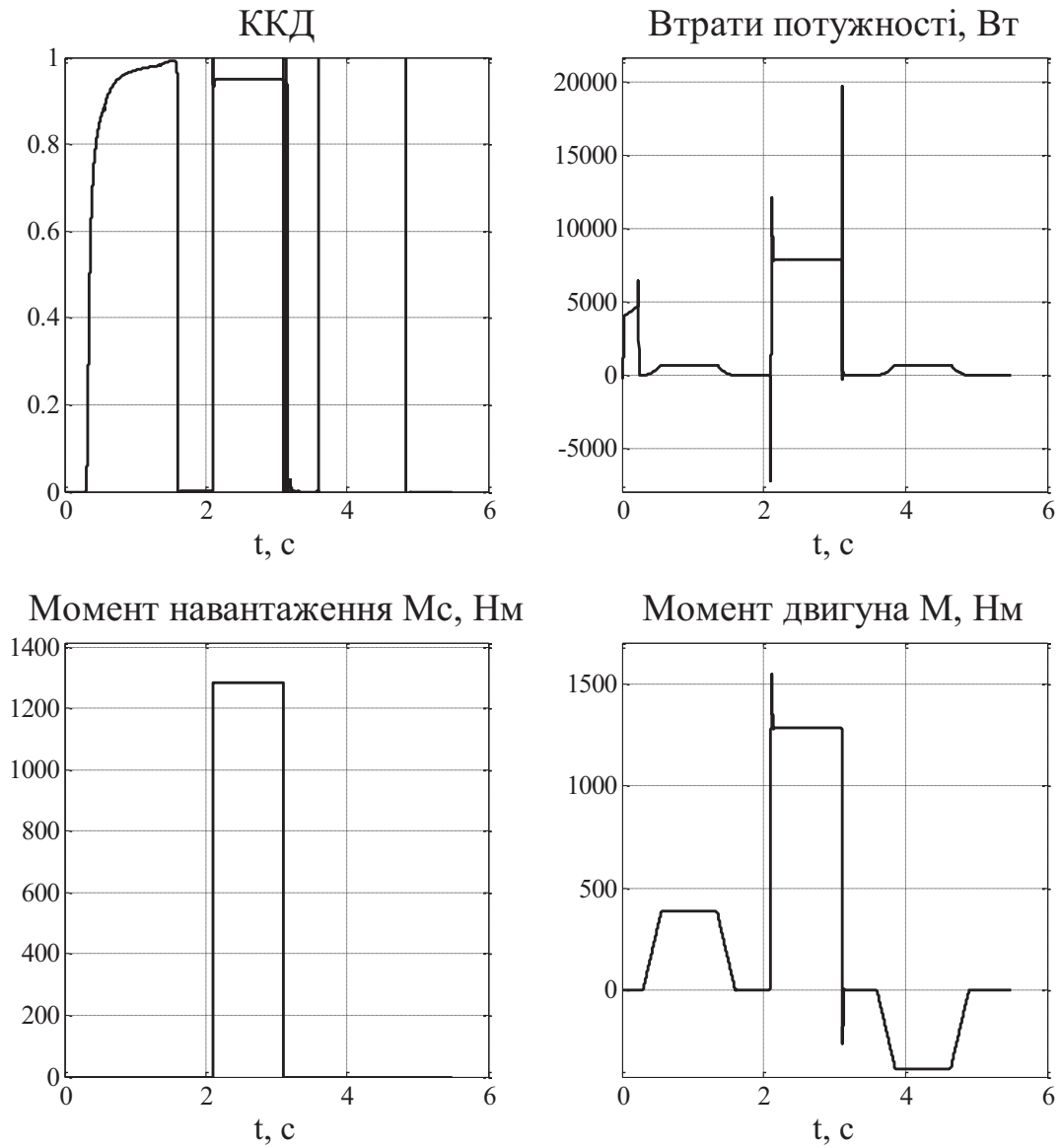
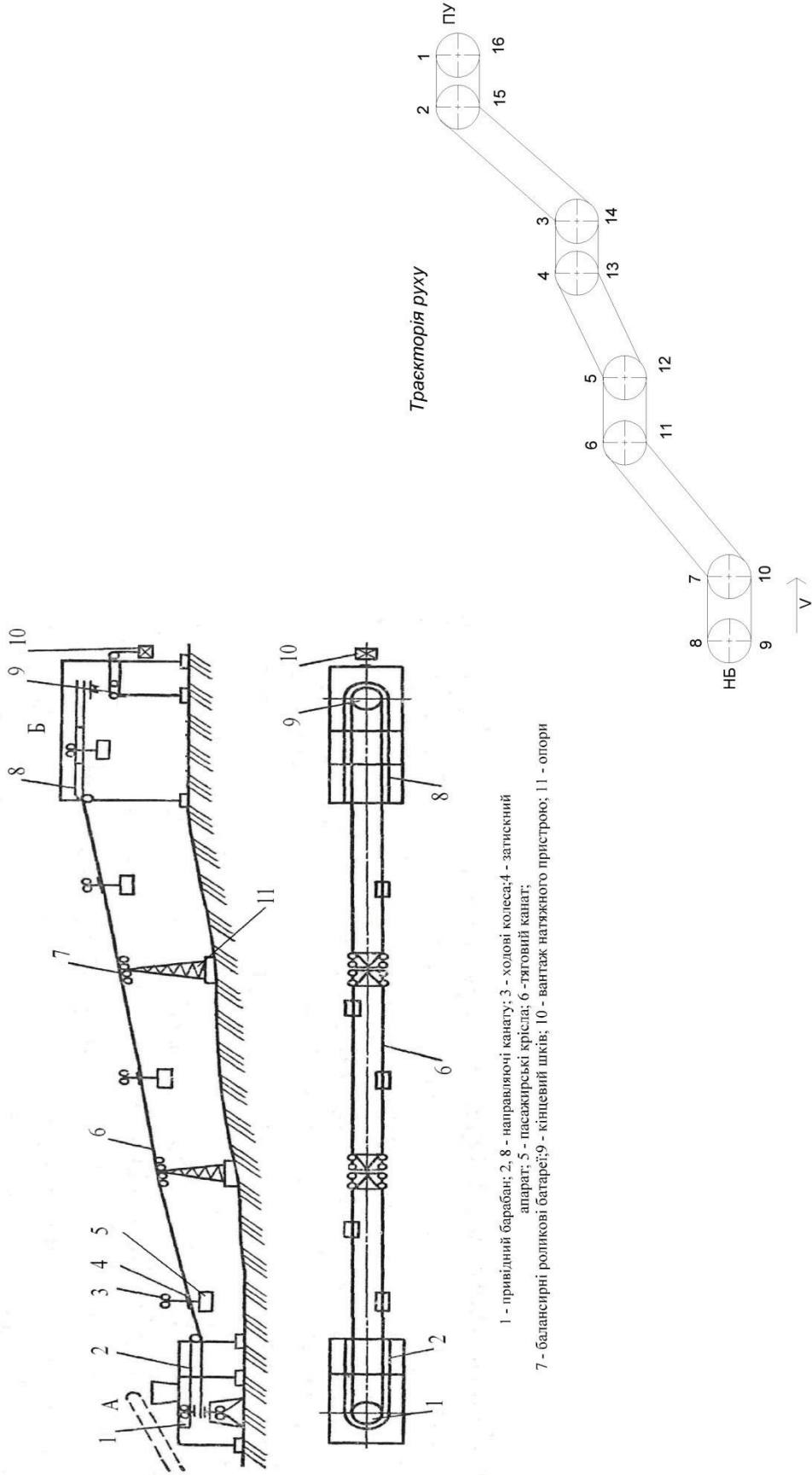
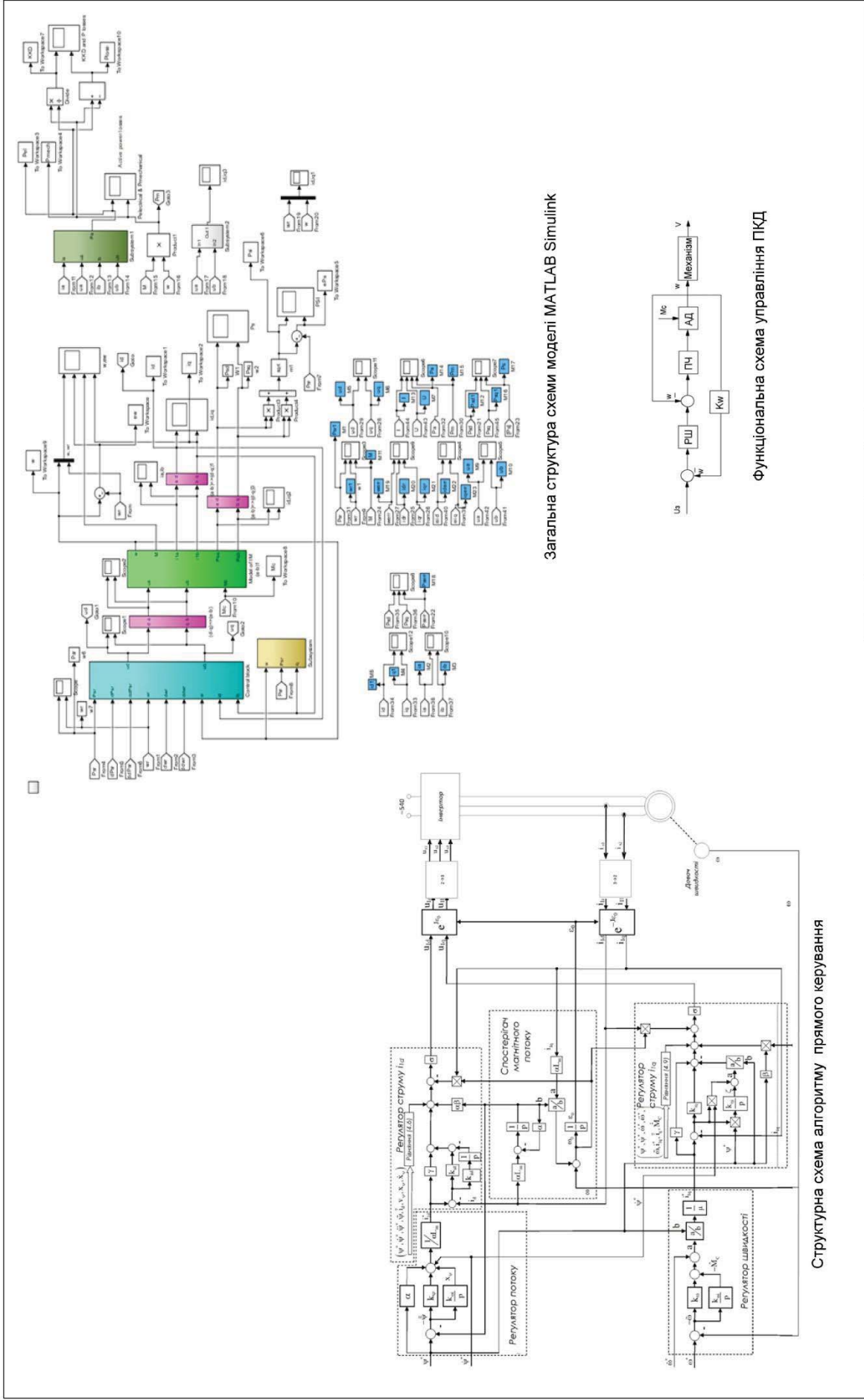


Рисунок 1 – Графіки перехідних процесів при $v=1.6\text{ м/с}$ та $M_c=M_{\text{сн}}=1286\text{ Нм}$

Схематичне зображення прикладу ПКД та привідної системи



									141.5116.015.МД				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	Дослідження режимів роботи підвісної канатної дороги при варіаціях її навантаження Технологічний лист					Склад	Аркуш	Аркуше	
Розроб.		Руднев Д. В.									1	6	
Перев.		Печеник М. В.											
Н.контр.													
Затв.										ЕП-91МП, ФЕА, КПІ			

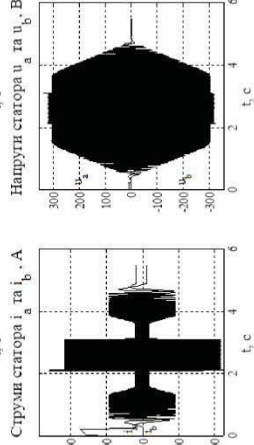
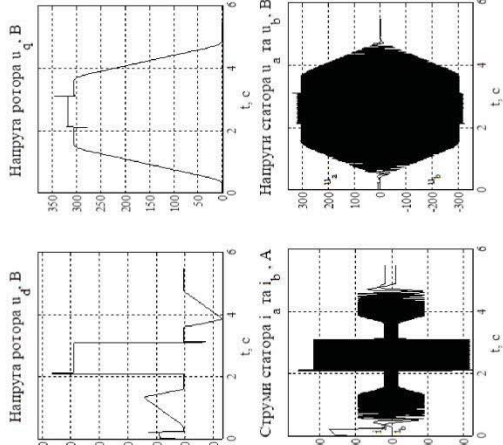
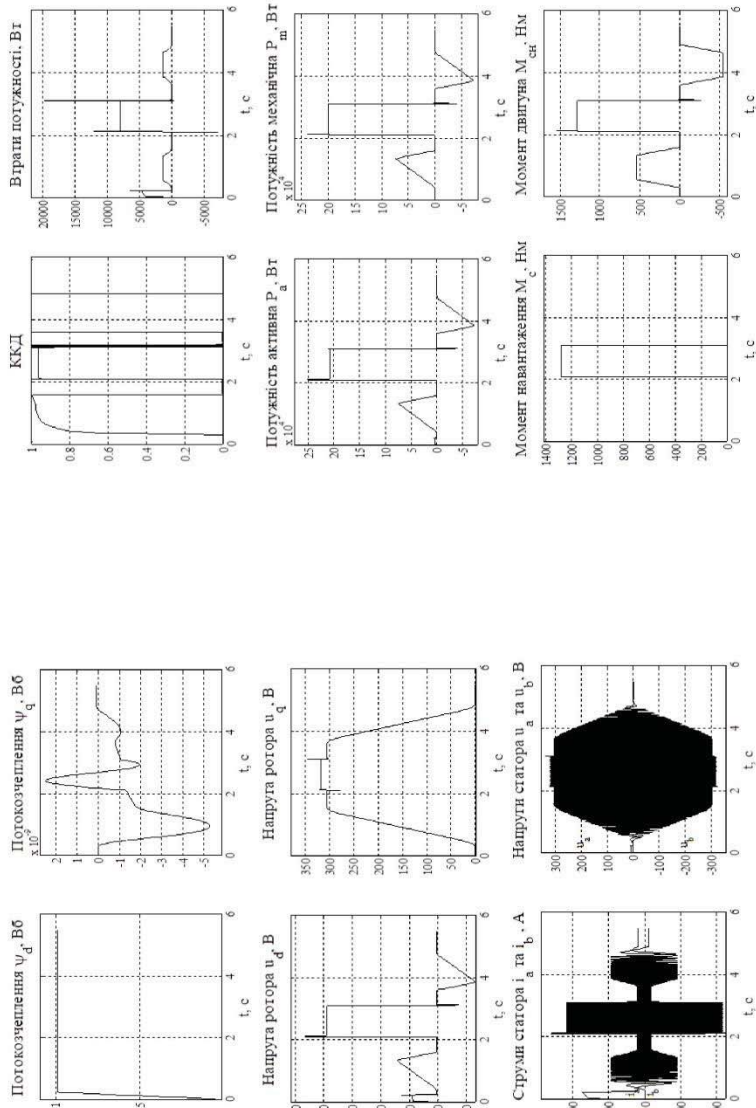
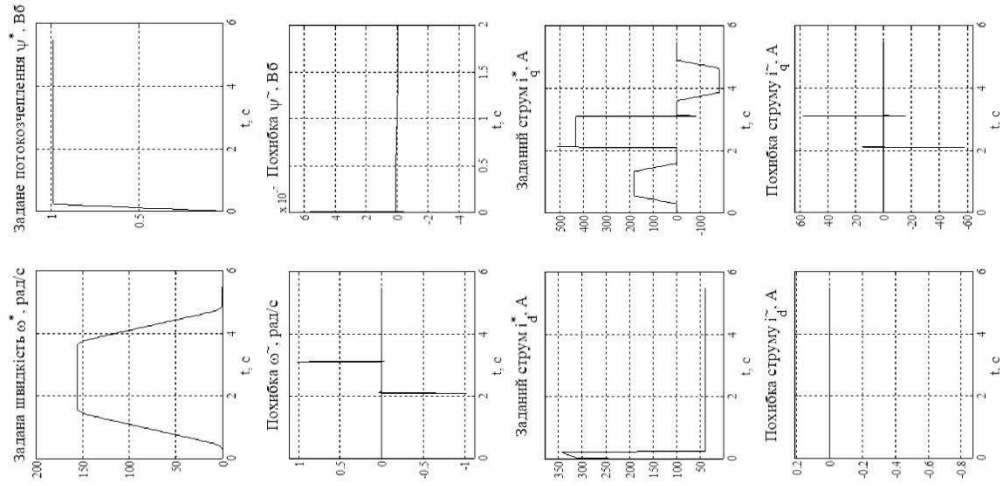


Загальна структура схеми моделі MATLAB Simulink

Функціональна схема управління ПКД

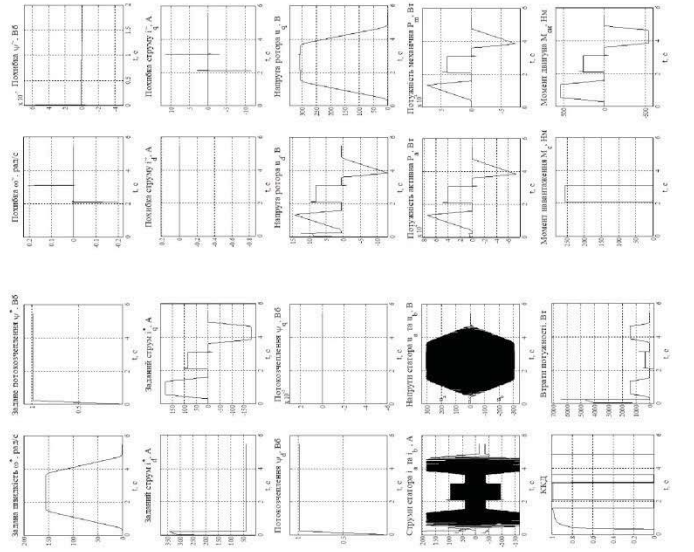
141.5116.015.МД			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.
Розроб.	Руднев Д. В.		
Перев.	Печеник М. В.		
Н. контр.			
Затв.			
Дослідження режимів роботи підвісної канатної дороги при варіаціях її навантаження			
Структурна схема алгоритму прямого керування та модель Matlab			
Сторінка	Аркуш	2	6
ЕП-91МП, ФЕА, КПІ			

Перехідні процеси при навантаженні $M_c = M_{сн}$

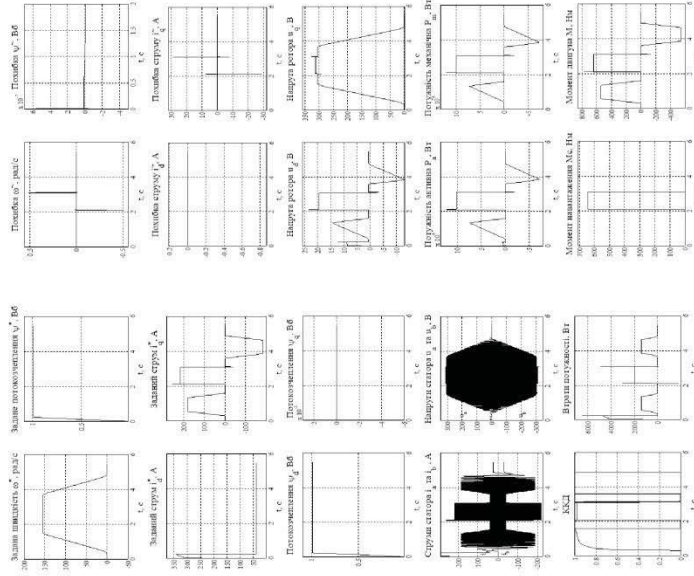


141.5116.015.МД				Дослідження режимів роботи підвісної канатної дороги при варіаціях її навантаження			
				Перехідні процеси при навантаженні $M_{сн}$			
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата	Станд.	Аркуш	Аркуше
Розроб.	Руднев Д. В.					3	6
Перев.	Печеник М. В.						
Н. контр.							
Затв.							
				ЕП-91МП, ФЕА, КПІ			

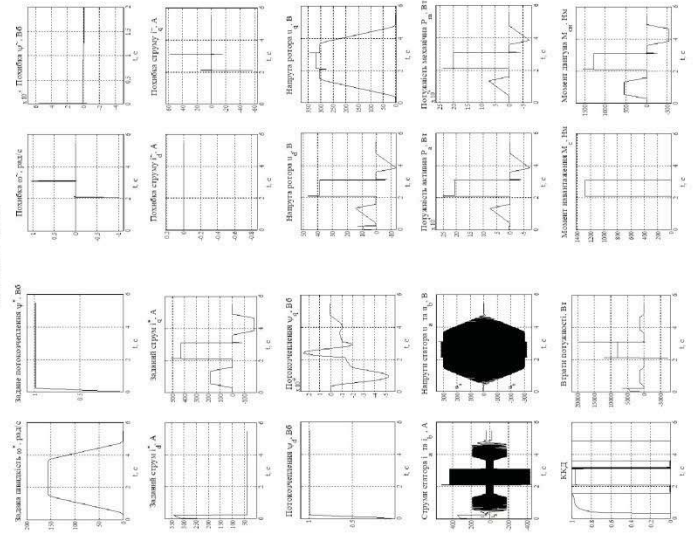
Дослідження перехідних процесів
при $M_c=0.2\text{Мсн}$



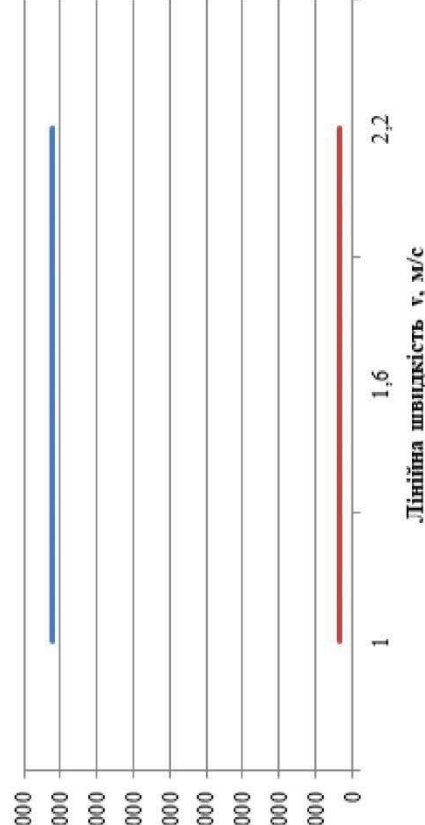
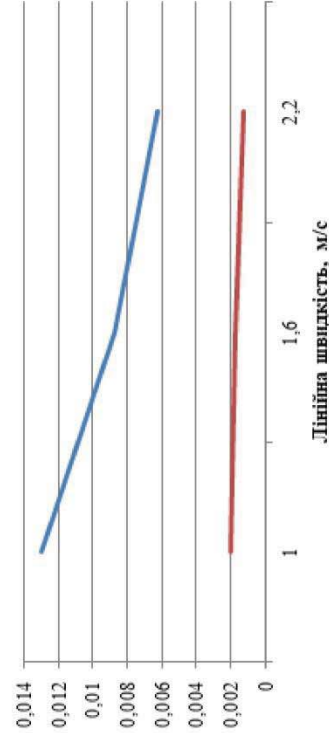
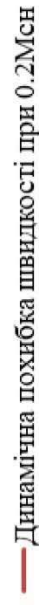
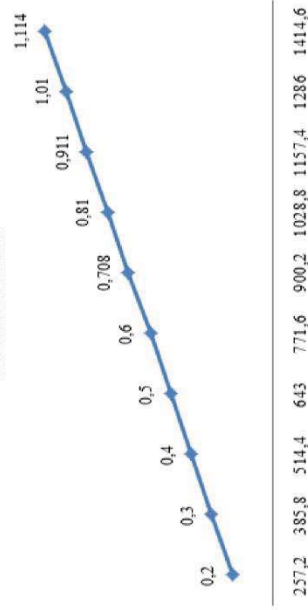
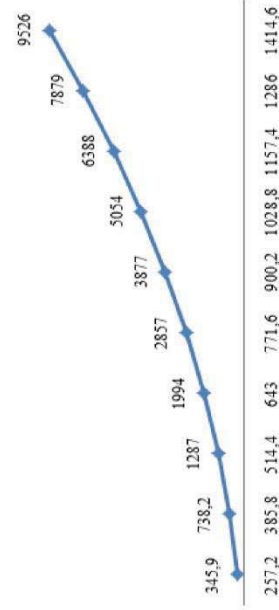
Дослідження перехідних процесів
при $M_c=0.5\text{Мсн}$



Дослідження перехідних процесів
при $M_c=\text{Мсн}$



141.5116.015.МД				Дослідження режимів роботи підвісної канатної дороги при варіаціях її навантаження			
Зм.	Арк.	№ об'єкт.	Підп.	Дата	Станд.	Аркуш	Аркуше
Розроб.	Руднев Д. В.					4	6
Перев.	Пененик М. В.						
Н. контр.							
Затв.							
				Перехідні процеси при зміні навантаження			
				ЕП-91МП, ФЕА, КПІ			

[illegible]